



Zerfallszyklen von EM-Anlagen

Forschungsauftrag VSS 1999/292

07. Juni 2006



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
2. Rahmenbedingungen für die Forschung	9
2.1 Einleitung	9
2.2 Abgrenzung der Forschungsarbeit.....	9
3. Zielsetzung	10
3.1 Zielsetzung Forschungsprojekt	10
3.2 Übergeordnete Zielsetzung Erhaltung	11
4. Grundlagen der Anlagen-Lebensdauer	12
4.1 Definition der Lebens- und Nutzungsdauer.....	12
4.2 Einfluss der Erhaltung auf die Nutzungsdauer.....	14
4.3 Gesamtsanierungen.....	15
4.4 Sanierung aufgrund von nicht-technischen Gründen.....	16
4.5 Schlussfolgerung.....	16
5. Nutzungsdauern in der Praxis	18
5.1 Einleitung	18
5.2 Erhebung bei ausgewählten Kantonen	18
6. Systembetrachtung bez. Alterungsprozess, dessen Beeinflussungsmöglichkeit und Zustandsdiagnostik	23
6.1 Einleitung	23
6.2 Leuchtmittel im Tunnel	23
6.3 Leittechnik	34
6.4 Energie-Kabelanlagen.....	42
6.5 Glasfaser-Kabelanlagen: Alterungsprozess und Kenngrössen	47
7. Zusammenfassende Resultate	55
7.1 Grundsätzliche Betrachtung.....	55
7.2 Hinweise und Empfehlungen	56
8. Anhang A1: Beschleunigte Alterung bei erhöhter Temperatur	58



8.1	Die Arrhenius-Gleichung	58
8.2	Die 10-Grad-Regel	58
9.	Anhang A2: Beschleunigte Alterung bei Glasfasern, Modellbeschreibung	61
9.1	Allgemeiner Hintergrund	61
9.2	Das Modell Risswachstum (Stressmodell).....	62
9.3	Das Modell Aktivierungsenergie.....	63
10.	Anhang A3: Anlagentabelle mit Nutzungsdauern, Muster	65
11.	Literaturverzeichnis	66
12.	Glossar.....	68
13.	Abbildungsverzeichnis.....	70



Impressum

Auftraggeber

Vereinigung Schweizerischer
Strassenfachleute (VSS)
Seefeldstrasse 9
8008 Zürich

Tel. +41 44 269 40 20

Auftragnehmer

AMSTEIN + WALTHERT AG
Andreasstrasse 11
CH-8050 Zürich

Tel. +41 44 305 91 11

Fax +41 44 305 92 14

Verfasser

Urs Welte
urs.welte@amstein-walthert.ch
Dr. Giorgio Friedrich
gfriedrich@dplanet.ch



Zusammenfassung

Die Forschungsarbeit hatte zum Ziel, Grundlagen zur Lebensdauer darzustellen und Methodiken aufzuzeigen, wie die optimale Nutzungsdauer von technischen Ausrüstungen in Tunneln ermittelt werden kann. Für ausgewählte Ausrüstungen werden Faktoren hergeleitet, welche die zu erwartende Lebensdauer wesentlich beeinflussen. Der Fokus der Forschung und Analysen richtete sich auf typische Aspekte im tunnelspezifischen Umfeld; da die Thematik generell bereits stark erforscht ist und im Rahmen einer derartigen Arbeit wenig Neues hinzugefügt werden könnte.

In einer ersten empirischen Analyse wurden durchschnittliche Nutzungsdauern von 15 ... 25 Jahren festgestellt, was als überraschend tief beurteilt werden muss.

Schliesslich wurden Systeme einer vertieften Analyse unterworfen, welche aus Sicht der Autoren im Tunnelumfeld noch wenig erforscht sind: Beleuchtungsanlagen, Elemente der Leittechnik, Energiekabelanlagen und LWL-Anlagen.

Es wurden Methodiken und Empfehlungen ausgearbeitet, welche dringend beachtet werden sollten: Die empirische Nutzungstabelle als „Basis-Instrument“, die Diagnostik bei Energie- und LWL-Kabelanlagen und die Beachtung der Stressfaktoren. Es wurde hergeleitet, dass bei Beachtung der Temperaturbedingungen in technischen Zentralen die Nutzungsdauer und die Ausfallwahrscheinlichkeit der technischen Systeme um Faktoren verbessert werden kann. Diese Erkenntnis ist in diesem Zusammenhang neu und bedarf besonderer Beachtung und Massnahmen.



Résumé

Le travail de recherche avait comme but, de pouvoir présenter des réflexions de base concernant la durée de vie et de élaborer des méthodes pour établir le temps de service des composantes d'infrastructure pour les tunnels. Pour des composantes / systèmes particulièr(e)s on a identifié des facteurs, qui ont une influence primordial concernant la durée de vie expectée. Le focus du travail était d'appliquer / adapter les connaissances actuelles en se rendant compte des aspect spécifiques de l'infrastructure des galeries. On a choisit ce chemin, parce que la thématique et la théorie de la fiabilité et déjà bien étudiier dans la technique appliqué (avion, composants électronique).

Dans une première investigation on a pu constater, que la moyenne du temps de service des composants varie de 15 à 25 ans; une durée de vie moyenne plus tôt courte!

Dans un chapitre suivant on a analyser sélectivement plus en détails des systèmes, qui sont selon l'avis des auteurs importants dans le contexte des galeries et en mêmes temps encore peu décrites dans ce cadre: Systèmes pour l'éclairage, éléments de la télé-informatique, câbles de haute tension et fibres et câbles optiques.

Le rapport a élaboré des méthodes et résume des conseillees, qui sont a suivre strictement pour éviter des pannes: la base de jugement est la table avec les temps de services des composants / systèmes, la diagnostiques des câbles de haute tension et des câbles à fibre optiques avec les facteurs complex de stress. On a démontré, que le temps de service des systèmes techniques dans des postes de commande peuvent être considérablement augmenté,

Si la température admissible est bien respectée et par conséquence contrôler. Ce jugement dans ce contexte peut être considérer comme une nouveauté, ce raisonnement devrait être mieux respecter faisant part des futures 'guidelines'.



Summary

The research project should establish basics to the system life cycle and methodologies to deduct optimum using periods for technical systems in tunnels. Many factors which have a relevant impact on the life cycle, they were discussed for selected systems. It focussed on typical aspects of tunnel systems only – taking into account an already profound general knowledge in the area of system life cycle analysis.

An empiric life cycle analysis was worked out on the basis of four cantons and a power distributor; the results showed average life periods between 15 and 25 years, the figures were deemed surprisingly low.

Further, a set of selected technical systems with less tunnel-specific life cycle data was scrutinized: illumination and monitoring systems, energy cabling systems and fibre optic cabling systems.

Recommendations and methodologies were described to define the useful life span of such equipment: Empiric life cycle matrices, to be used as „basic data collection tool“, diagnostic methods for energy and fibre optic cabling systems, and the relevance of stress factors. It was clearly shown that to follow conservative temperature ranges in technical equipment centers is mandatory for such equipment and that high ambient temperature will enlarge the down-time risk dramatically. This outcome is fairly new in relation to tunnel equipment and currently not taken into account with the necessary attention.



Riassunto

L'investigazione attuale aveva come obiettivo, di poter presentare ragionamenti fondamentali riguardando il tempo di vita e di elaborare methods per determinare il tempo ottimale di servizio delle apparecchiature previste per l'infrastruttura in gallerie per autostrade. In oltre, per sistemi particolari il rapporto ha identificato dei fattori primordiali che hanno una grande influenza sulla durata di vita aspettativa. Il focus di questa ricerca era di adattare la conoscenza attuale rendendosi conto della situazione parziale nella galleria. Si ha scelto questo modo di studio, perchè il problema / metodo della sicurezza dei sistemi tecnici e già conosciuto a fondo (aviazione, componenti in elettronica).

In una prima parte si puo notare che la media del "tempo in servizio" varia entro i 15 e i 25 anni; questa durata di vita e considerata come troppo corta, anche pensando in modo economico.

Un capitolo seguente tratta in modo più profondo sistemi tecnici, che sono analizzati fin oggi secondo l'opinione dei autori troppo scarsi, specialmente considerando il ambiente della galleria stradale: Sistemi per la illuminazione, elementi della tele-informatica, sistemi di cavi alta-tensione e cavi a fibre ottiche.

L' investigazione presenta vari metodi e consigli, che sono a seguire seriamente: la tabella con i tempi di vita dell'equipaggio elettro-meccanico usato per la galleria, un riassunto del principio della diagnostica applicato per i cavi di alta tensione e cavi fibre ottiche riguardando il stress di vario tipo (pattern recognition). Si nota, che rispettando la temperatura ambientale dell'equipaggio i tempi di funzionamento (durata di vita) sono prolungati in modo effettivo. Questo fatto in relazione con il problema dell'infrastruttura della galleria puo essere considerato come nuovo chiedendo di adottare delle misure convenienti.



1. Einleitung

Die technischen Ausrüstungen in Strassenverkehrsanlagen nehmen eine immer höhere Bedeutung ein, vor allem in Tunneln. Der Investitionswert der Technik hat im Verhältnis zu den Gesamtbaukosten in den vergangenen Jahren stetig zugenommen; in der Erhaltung steigen die Kosten für den Technik-Unterhalt bis auf 50% der gesamten Erhaltungskosten.

Seit langem hat deshalb die Systematisierung der Erhaltung im Hinblick auf ein optimales „Asset Management“ eingesetzt. Im Bereich der elektromechanischen Anlagen wurde beispielsweise das EMS (Equipment Management System) entwickelt, ein software-basiertes Erhaltungsinstrument zur Unterstützung des geplanten und ungeplanten Unterhalts. Es ist bereits in mehreren Kantonen im Einsatz und dient dem technischen Personal in der Durchführung der Erhaltungsaufgaben.

Weniger im Blickpunkt der Bemühungen standen bisher die Erneuerung und damit der optimale Zeitpunkt von Ersatzmassnahmen bei technischen Anlagen. Diese Forschungsarbeit soll diese Lücke füllen und Hinweise und Methoden im Zusammenhang mit der optimalen Nutzungsdauer von technischen Anlagen geben.



2. Rahmenbedingungen für die Forschung

2.1 Einleitung

Die Erforschung von optimalen Nutzungsdauern ist ein weites Gebiet, das laufend vielfältig erforscht und in verschiedenen Gremien auch intensiv behandelt wird.

Allen diesen Grundlagen haftet allerdings der Nachteil an, dass die Ergebnisse nicht direkt auf EM-Anlagen *in Strassenverkehrsanlagen* übertragen werden können, da sie zu konkret auf industrielle Einzelanlagen oder sogar Komponenten von Systemen ausgerichtet sind – oder, sich auf Anlagen aus speziellen Anwendungsgebieten beziehen. Die vorliegende Arbeit ist deshalb auf die Betreiber (und Besitzer) der Strassenverkehrsanlagen ausgerichtet; diese fokussieren sich zumeist auf die für sie relevanten Anlagengruppen.

2.2 Abgrenzung der Forschungsarbeit

Wie oben angemerkt, ist der Kenntnisstand über Lebensdauern, Ausfallraten, Zuverlässigkeiten, etc. von Komponenten und Systemen im industriellen Umfeld sehr hoch. Der Bau von Systemen mit hohen Schäden oder Folgekosten beim Ausfall (Flugzeuge, Satelliten, Kernkraftwerke) haben dieses Know-how auf einen bemerkenswert hohen Stand gebracht. Die vorliegende Forschungsarbeit konzentriert sich deshalb vor allem auf Integration von vorhandenem Wissen in das Umfeld der technischen Ausrüstung von Strassenverkehrsanlagen.

3. Zielsetzung

3.1 Zielsetzung Forschungsprojekt

Auf der Grundlage von Erhaltungssystemen wie EMS werden Methoden und Verfahren entwickelt, die der Ermittlung des 'Zerfallszyklus' einer technischen Anlage dienen. Diese Methoden werden auf die EMS-Systematik¹ abgestützt und darin integriert. Betrachtet man die (bisherige) Zielsetzung im Erhaltungsmanagement von technischen Ausrüstungen, kann die vorliegende Arbeit als eine Erweiterung und folgerichtige Abrundung der EMS-Systematik betrachtet werden.

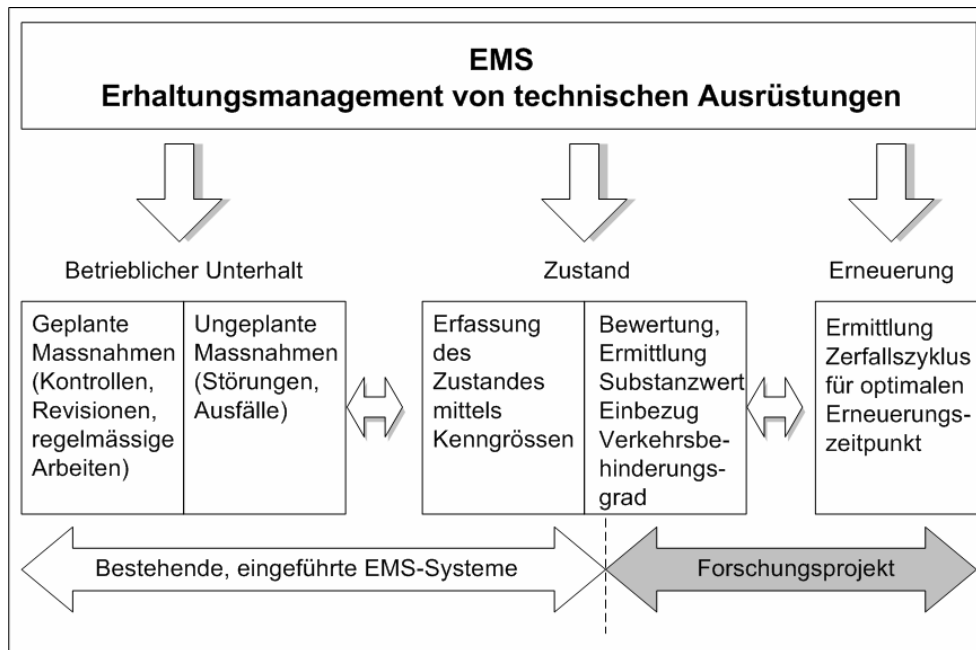


Abb. 1 Erhaltungsmanagement von technischen Ausrüstungen

¹ Unter EMS-Systematik versteht man die Erhaltung von EM-Anlagen mittels eines definierten Vorgehens, welches die Zustandserfassung und –Bewertung der EM-Anlagen mittels Kenngrössen enthält.



3.2 Übergeordnete Zielsetzung Erhaltung

Die Erhaltung verfolgt grundsätzlich immer das Ziel, eine Anlage möglichst lange, mit geringen Ausfallraten und zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten in Betrieb zu halten. Es wird im Folgenden zugrunde gelegt, dass die Ausnutzung der möglichen Lebensdauer als Ziel anerkannt wird, wobei die Ausfallraten berücksichtigt werden. Szenarien, in welchen die Anlagen aus anderen Gründen – ohne Berücksichtigung der Lebensdauer – ersetzt werden, werden ebenso betrachtet (solche Szenarien kommen oft vor; meist sind bauliche Massnahmen Auslöser von Gesamtanierungen, welche die EM-Ausrüstung beinhaltet).

In Anlehnung an Normen [1] können aber auch weitere Kriterien ins Spiel kommen, die zusätzlich zu eingangs erwähnter Definition zu berücksichtigen sind. Hier eine Auswahl:

- Betriebsbereitschaft
- Leistungsfähigkeit
- Verkehrssicherheit
- Benutzerfreundlichkeit
- Substanzerhaltung
- Gesamtwirtschaftliche Kosten
- Umweltverträglichkeit

Aus der Gewichtung dieser Kriterien kann auf Strassen-Netzebene eine Erhaltungsstrategie abgeleitet werden, welche einen direkten Einfluss auf die praktische Nutzungsdauer hat.

Die Unterhaltsplanung der Nationalstrassen UPlaN² ist eine übergeordnete Zielsetzung, die zu einer Erhaltungsstrategie führt. Bei Anwendung von UPlaN steigt der Betrachtungszeitraum sehr stark an: Bei einer Planungszeit von rund 5 Jahren, einer Realisierungsdauer von einem Jahr und einer Baustellenfreiheit von 10 Jahren muss mit *17 Jahren* gerechnet werden.

Es ist abzusehen, dass bei einer derartigen übergeordneten Zielsetzung die optimale Nutzungsdauer des einzelnen Systems untergeordnete Bedeutung erhält: Das langfristig vorgegebene Unterhaltsfenster muss genutzt werden, die Anlagen zu ersetzen. Es ist folglich eine erklärte Zielsetzung, dass die Anlagen bis zum nächsten Unterhaltsfenster wirtschaftlich betrieben werden können (>15a)³.

² UPlaN stellt folgende Arbeitshypothesen auf: maximale Länge eines Unterhaltsabschnitts: 15 km, minimaler Abstand zwischen zwei Unterhaltsabschnitten: 50 km und minimaler unterhaltsfreier Zeitraum auf einem Unterhaltsabschnitt: 10 Jahre

³ In dieser Überlegung wird davon ausgegangen, dass ein Anlagen-Ersatz mit Verkehrsbehinderungen verbunden ist.

4. Grundlagen der Anlagen-Lebensdauer

4.1 Definition der Lebens- und Nutzungsdauer

Im Titel dieser Forschungsarbeit kommt der etwas unübliche Begriff *Zerfallszyklus* vor. Dieser Begriff stellt aber die Situation recht gut dar: Technische Anlagen werden installiert und nach einer Nutzungsdauer (mit abnehmender Verfügbarkeit), die sehr stark von der Art des Systems abhängt, wieder ersetzt - der Zyklus beginnt von neuem.

Betrachten wir ein System und seine Lebensdauer für sich, ohne Einbezug des Umfeldes, kann die Lebensdauer *intrinsisch* definiert werden. Die Grundlage hierzu ist die Darstellung der Lebensdauer über die Fehlerrate mittels der berühmten *Badewannen-Kurve*. Diese Charakteristik ist die häufigste und wahrscheinlichste; sehr weitgehende Untersuchungen in der Industrie haben aber gezeigt, dass auch durchaus andere Verläufe vorkommen: Konstante Fehlerrate, konstant zunehmende Rate, etc. [2].

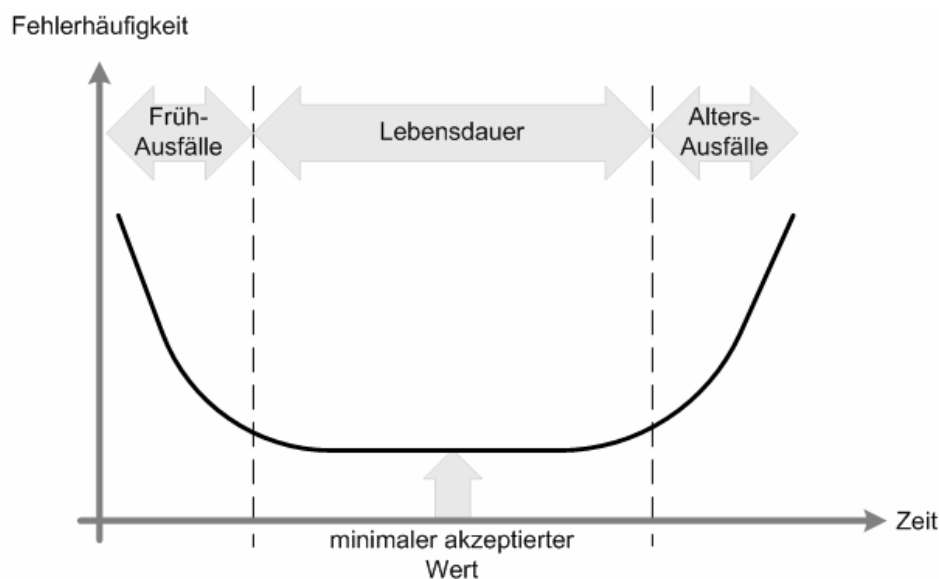


Abb. 2 Darstellung der Nutzungsdauer/Lebensdauer mittels Badewannen-Kurve

In der obigen Darstellung werden drei Lebenszonen unterschieden:

Frühausfälle: Während dieser Periode sind Frühausfälle oder Defekte zu beobachten, die mit der Zeit rasch abnehmen. Die Frühausfälle werden durch fehlerhafte (kostengünstige!) Bauteile, Verbindungsfehler, mechanischer Beanspruchung beim Transport, unsachgemäße Lagerung vor dem Einbau, Montagebeanspruchung, usw. verursacht. Die Frühausfälle können vermindert werden, wenn die oben angeführten Risiken vermieden oder spezielle burn-in-(Einbrenn)-Prozeduren für Anlageteile und Bauteile an-

gewandt werden (Halbleiterindustrie). Dies führt allerdings zu deutlich höheren Kosten.

Lebensdauer: Der mittlere Bereich entspricht der Lebensdauer, welche gemäss intrinsischer Definition der *maximal möglichen Nutzungsdauer* entspricht. Während dieser Periode liegen die statistischen Ausfälle in einem akzeptierten Bereich.

Nutzungsdauer: Die Nutzungsdauer ist i.d.R. kürzer als die Lebensdauer, da sie der Periode entspricht, während der das System *sinnvoll eingesetzt* werden kann; man spricht auch von der *useful life period*. Diese Definition ist in der Regel *extrinsisch*, d.h. die äusseren Bedingungen, unter welcher die Anlage eingesetzt wird, werden berücksichtigt. Beispielsweise kann ein System als Teil einer Gesamterneuerung ersetzt werden, ohne dass es die Lebensdauer bereits erreicht hat. Zudem wird die Nutzungsdauer von zwei weiteren Kriterien massgeblich beeinflusst: Wirtschaftlichkeit des Betriebes (Reparaturkosten), Schadensausmass bei Ausfall (Sicherheitsüberlegung).

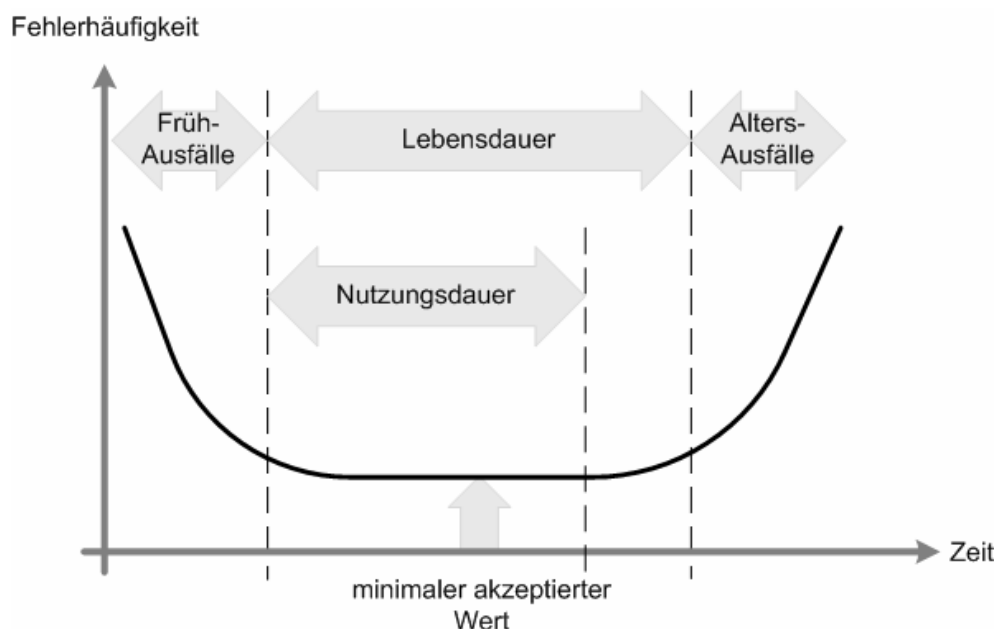


Abb. 3 Darstellung der Lebens- und Nutzungsdauer mittels Badewannen-Kurve

Während der *useful life period* fällt die Ausfallrate auf ein statistisches, anlagentypisches Mass zurück. Dieser Wert muss selbstverständlich in einem akzeptierten Rahmen sein (deshalb wird in der Figur von „minimaler akzeptierter Wert“ der Fehlerhäufigkeit gesprochen). Diese minimale statistische Fehlerhäufigkeit wird durch Temperatureinflüsse und mechanische Belastungen vergrössert.

Alters-Ausfälle: Nach einer gewissen Zeit beginnen die Ausfälle zu steigen; die Anlage nähert sich dem Lebensende. Alterungsprozesse in den Bauteilen, Belastung durch Temperatur, Feuchtigkeit, Gase und mechanische Beanspruchung (Wind, Vibrationen im Tunnel) beschleunigen diesen Prozess.

4.2 Einfluss der Erhaltung auf die Nutzungsdauer

Eine Erhaltungstätigkeit hat i.d.R. das Ziel, die Nutzungsdauer mit einem minimalen Einsatz an Mitteln (Geld, Personal) zu verlängern, oder das Risiko für Ausfall zu minimieren.

Die Art der Erhaltungstätigkeiten hat einen grossen Einfluss auf die Nutzungsdauer. Eine Erhaltungsstrategie, welche auf den Typ der Systeme abgestimmt ist, kann zu einer wesentlichen Verlängerung der möglichen Nutzung führen.

(Die Erhaltungs-Optimierung auf Systemebene ist breit erforscht [2], [4], [5], das entsprechende Wissen wird hier als bekannt vorausgesetzt. Es werden nur die für das Strassenwesen relevanten Elemente herangezogen.)

Wird eine Erhaltungsstrategie aufgestellt, muss sie sich an einem oder an mehreren Zielen orientieren. Zielsetzung einer derartigen Strategie kann sein:

- Hohe Zuverlässigkeit bzw. geringe Fehlerhäufigkeit über die Nutzungsdauer
- Möglichst lange Nutzungsdauer zu vertretbaren Kosten
- Optimale Werterhaltung im Sinne des Substanzwertes

Zielsetzung Zuverlässigkeit

Die Ausrichtung einer Erhaltungsstrategie auf hohe Zuverlässigkeit ist nur möglich, wenn die Anlage bez. Ausfallverhalten sehr genau bekannt ist: Es müssten beispielsweise Zahlen zur mittleren Ausfallzeit (MTBF, mean time between failures) vorliegen.

Beispiel:

Hat ein technisches System eine Ausfallwahrscheinlichkeit, die praktisch über die ganze Lebensdauer konstant ist (z.B. nicht abhängig von Umwelteinflüssen oder betrieblichen Unterhalt), kann man auf präventiven Unterhalt verzichten. Präventiver Ersatz von Teilen oder Komponenten des Systems erhöht dann nämlich die Verfügbarkeit nicht. Die Erhaltungsstrategie würde folglich lauten: Ersatz von defekten Anlagenteilen erst bei Ausfall des Systems.

Zudem müsste die Veränderung der Ausfallrate über die Zeit bekannt sein (konstant? zunehmend? abnehmend?). Solche Angaben sind selten vorhanden und werden von Herstellern und Lieferanten in der Regel nicht bekannt gegeben. Man ist auf eigene Erfahrungen oder Erhebungen angewiesen. Letzteres ist in der Praxis kaum möglich, da die

ganze Lebensdauer als Beobachtungszeitraum notwendig ist.

Damit ist auch der Grund gegeben, weshalb im Strassenverkehrsbereich selten Erhaltungsstrategien umgesetzt werden, welche auf statistischen Daten beruhen. Der Aufwand hierfür ist unverhältnismässig hoch.

Zielsetzung Substanzerhaltung

Eine andere mögliche Erhaltungsstrategie ist die Ausrichtung auf die *Substanzerhaltung*, welche auf einem monetären Ansatz beruht.

Beispiel:

Liefert ein Hersteller nach 10 Jahren keine Ersatzteile mehr (was üblich ist), kann es sinnvoll sein, gewisse Komponenten anzuschaffen und/oder präventiv zu ersetzen. Man vermeidet damit eine grosse Verminderung des Substanzwertes, da ohne die Bezugsmöglichkeit von Originalersatzteilen die Wiederherstellungskosten stark ansteigen.

Diese uni-kriterielle Sichtweise stellt die Kosten der Wiederherstellung einer Anlage in den Vordergrund. Man definiert hierbei den Substanzwert indirekt über die Erneuerungskosten und versucht, durch (Teil-)Erneuerungen, den Substanzwert möglichst zu erhalten.

Diese Erhaltungsstrategie kann dann gefahren werden, wenn die technischen Ausrüstungen kontinuierlich beobachtet werden. Dies ist allerdings in der Regel der Fall.

Die Norm SN 640904 [6] stellt den Sachverhalt wie folgt dar:

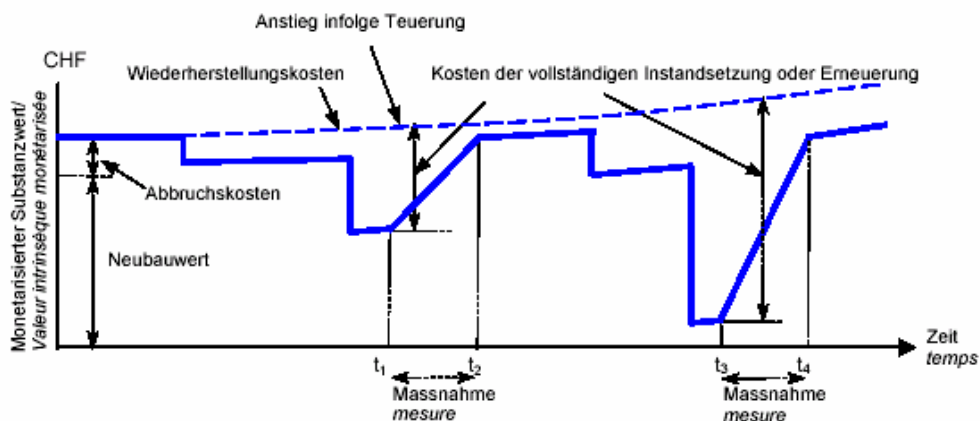


Abb. 4 Substanzwert monetarisiert [6]

4.3 Gesamtsanierungen

Verschiedene Faktoren führen immer mehr dazu, anstelle von einzelnen Anlagensanierungen Gesamtsanierungen vorzunehmen. Dadurch werden die Verkehrsbehinderungen auf einen limitierten und überschaubaren Zeitraum begrenzt. Im Weiteren führen oft übergeordnete Sanierungsbedürfnisse zu Sanierungen, welche nicht ohne Einbezug der Erneuerung von EM-Anlagen denkbar sind. Beispiel: Sanierung von Fahrbahnplatten, Wandverkleidungen, Einbau und/oder Sanierung von Zwischendecken, etc. führen zwingend zur Erneuerung der davon betroffenen Kabelkanäle und Trassen sowie der Installationen im Fahrraum wie Kameras, Messgeräten, Kommunikationsanlagen.

Ob durch die Gesamtsanierungen die mögliche Nutzungsdauer der Anlagen verkürzt wird, kann abschliessend nicht belegt werden, da auch der gegenteilige Fall eintreten kann: Sanierungen werden auf eine geplante,



künftige Gesamtsanierung hinausgeschoben. Mit Sicherheit kann festgestellt werden, dass langlebige EM-Anlagen wie Kabelanlagen durch diesen Umstand vor Erreichen der möglichen Nutzungsdauer ersetzt werden.

Es wurden einige typische Gesamtsanierungen in der Schweiz betrachtet, und es konnten die untenstehenden Schlüsse gezogen werden.

Gründe für Gesamtsanierungen	Bemerkungen
Bauliche Erneuerung des Tunnels	Fahrbahn, Gewölbe, Abdichtungen, etc.
Anpassung an veränderte Umwelt- oder Sicherheitsanforderungen	Veränderung Lüftungssystem, Einbau Zwischendecke, neue Fluchtwege
Ein grosser Anteil der Ausrüstung hat das Lebensende erreicht	Die sanierungsbedingte Tunnelsper- rung wird für den Ersatz weiterer Anla- gen benutzt.
Spezielle Anforderungen	Es wird eine Wartungsfreiheit für eine bestimmte Periode gefordert, was eine Gesamtsanierung nötig macht (vor allem bei Tunnel mit hohem Ver- kehrsaufkommen).

Abb. 5 Gründe für Gesamtsanierungen

4.4 Sanierung aufgrund von nicht-technischen Gründen

Vielfach müssen Anlagen ersetzt werden, welche die Nutzungsdauer noch nicht erreicht haben, weil andere, spezielle Gründe den Ersatz nötig machen. Neben baulichen Gründen (vgl. oben, Gesamtsanierungen) sind dies namentlich immer häufiger folgende Gründe:

- Fehlender Support, ausgelöst durch Firmenumstrukturierungen, Firmenverkäufe und Technologiewechsel
- Ersatzteildienst wird nach einer Periode $<$ Nutzungsdauer eingestellt
- Anforderungen an die Anlagen ändern
- Erhöhung/Herabsetzung der maximal zulässigen Geschwindigkeit eines Strassenabschnittes

4.5 Schlussfolgerung

Die obigen Überlegungen lassen folgenden Schluss zu: In der Lebensdauer einer Anlage gibt es ein Zeitfenster, in welchem die Anlage mit hoher Wahrscheinlichkeit ersetzt wird. Dieses Zeitfenster wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst, die wichtigsten sind:

- Lebensdauerkurve der Anlage



- Umfang der (präventiven) Erhaltung
- Bauliche Sanierungen, Gesamtsanierungen
- Anforderungen an die Anlage werden geändert (erhöht)
- Übergeordnete, technische und nicht-technische Gründe (fehlender Support, Firmenschliessungen, u.ä.)



5. Nutzungsdauern in der Praxis

5.1 Einleitung

In vier Kantonen wurden Erhebungen durchgeführt. Ziel war es, die in diesen Kantonen üblichen Nutzungsdauern zusammenzustellen und zu vergleichen.

Die Ergebnisse werden auch mit anderen Daten verglichen, namentlich mit den Nutzungsdauern eines Elektrizitätswerks und den Zahlen der Tunnelnorm [7].

5.2 Erhebung bei ausgewählten Kantonen

In vier Kantonen (im Folgenden genannt Kanton1, Kanton2, usw.) wurden die Nutzungsdauern typischer Anlagen und Systeme erfasst. Die ausgewählten Kantone verfügen alle über einen entsprechenden Tunnelpark, der ein gewisses Alter erreicht hat und damit für die Thematik der Anlagensanierung und des Systemersatzes relevant ist.

Die Erhebungen haben nur eine beschränkte statistische Relevanz. Die Erhebungen stellen eine konkrete Momentaufnahme als Basis für die vertiefte Untersuchung dar.

Die graphische Darstellung der Nutzungsdauern basiert auf folgenden Grundlagen:

- Abszisse (x-Achse): Anzahl Jahre, nach denen die Anlagen üblicherweise ersetzt werden. Genauigkeit der Erhebung: 5 Jahre
- Ordinate (y-Achse): Anzahl Anlagen, nicht gewichtet bezüglich Wert, Wichtigkeit, etc.

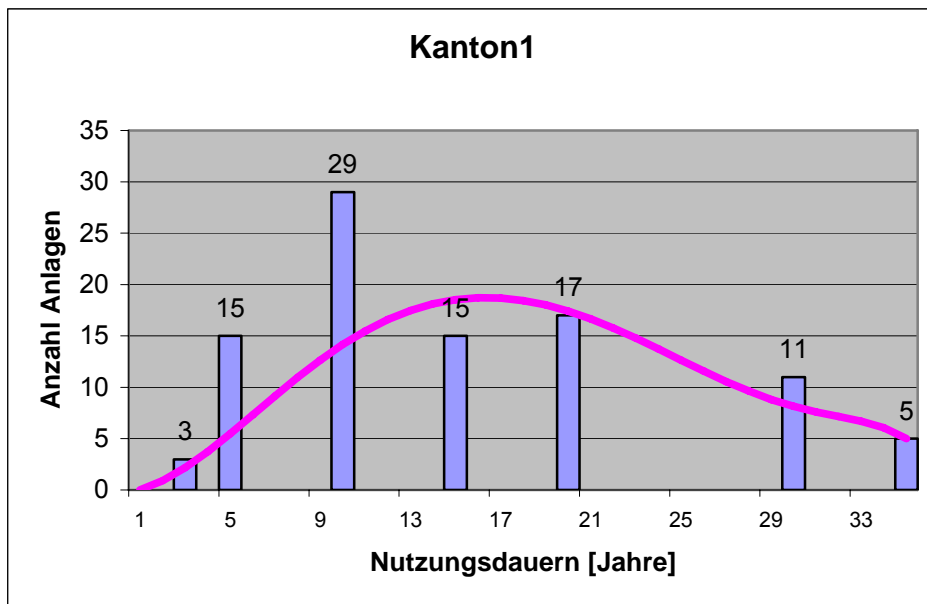


Abb. 6 Nutzungsdauern im Kanton 1

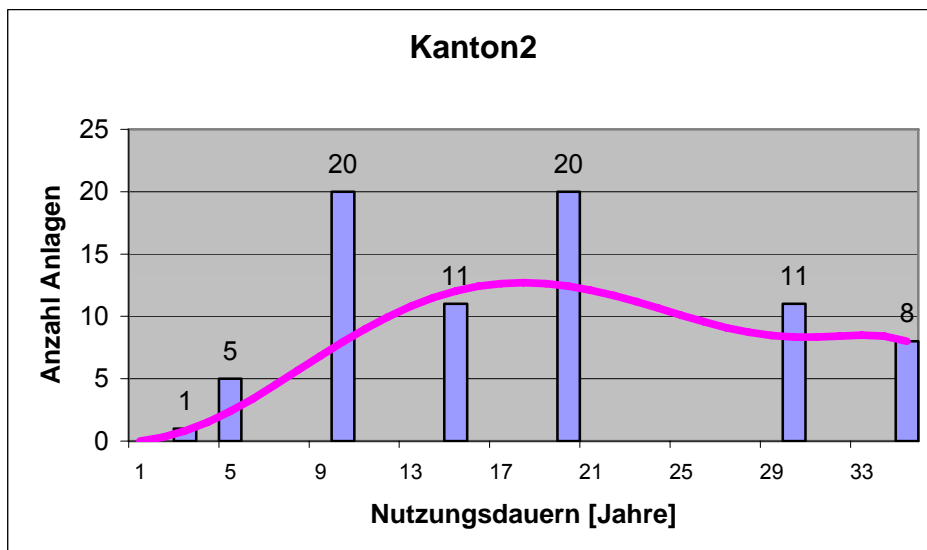


Abb. 7 Nutzungsdauern Kanton 2, mittlere Nutzungsdauer liegt bei rund 13 Jahren

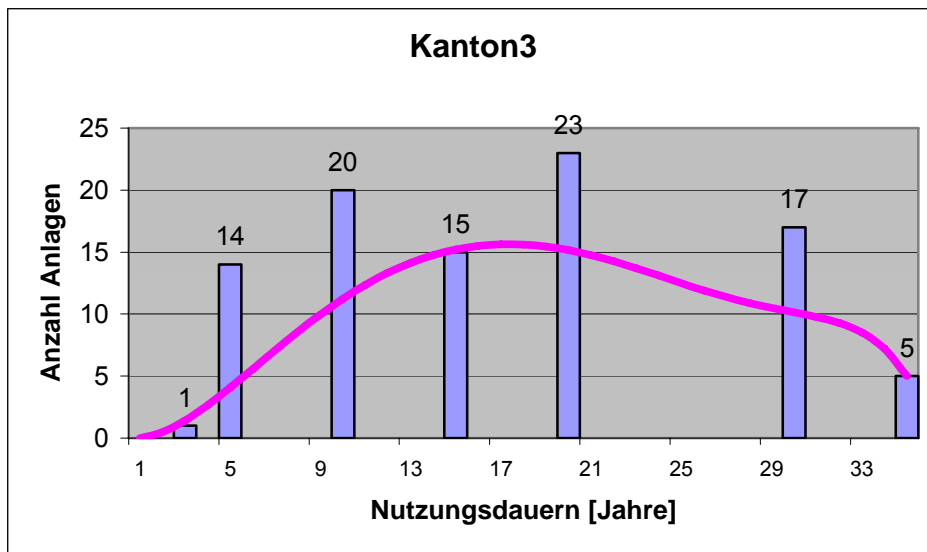


Abb. 8 Nutzungsdauern im Kanton 3

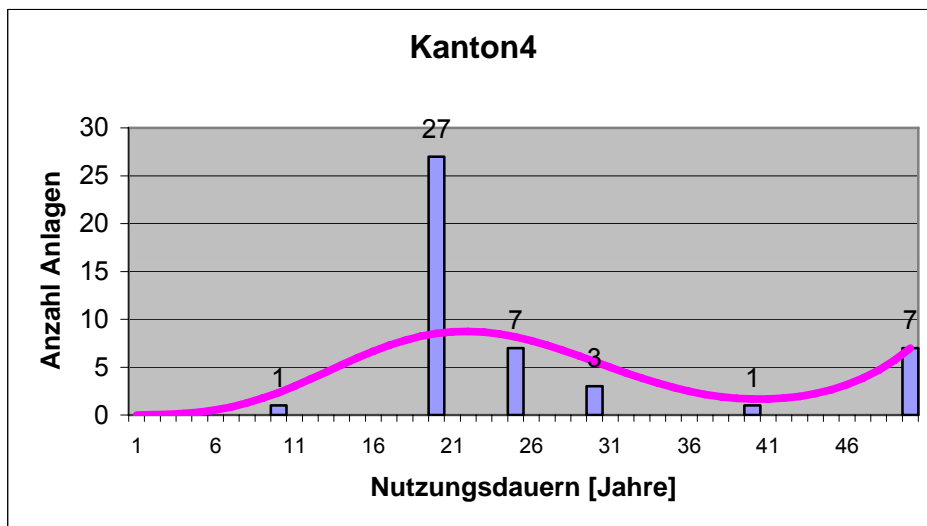


Abb. 9 Nutzungsdauern im Kanton 4

Die Übersichten zeigen – mit Ausnahme des Kantons4 – eine recht hohe Übereinstimmung. Im Kanton4 haben zum Teil übergeordnete Faktoren und Prioritäten zu Gesamtanierungen geführt; dadurch ergab sich eine Nutzungsdauer von fast ausschliesslich 20 Jahren.

Interessant ist zudem ein Vergleich mit einem Elektrizitätswerk und der Tunnelnorm [7].

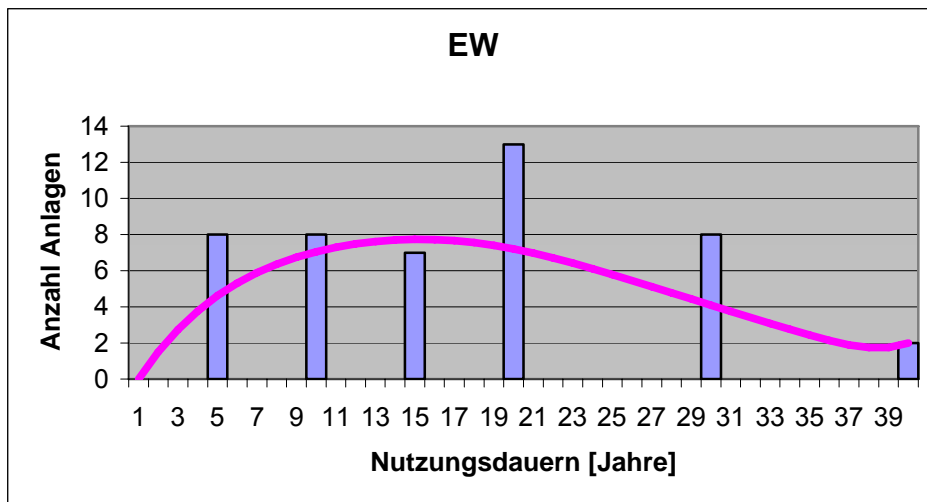


Abb. 10 Nutzungsdauern in einem Elektrizitätswerk

Die Analyse in einem grösseren Elektrizitätswerk zeigt, dass die vermehrte Ausrichtung auf leittechnische Anlagen ein deutliches Schwergewicht bei Nutzungsdauern von 15 und weniger Jahren ergibt.

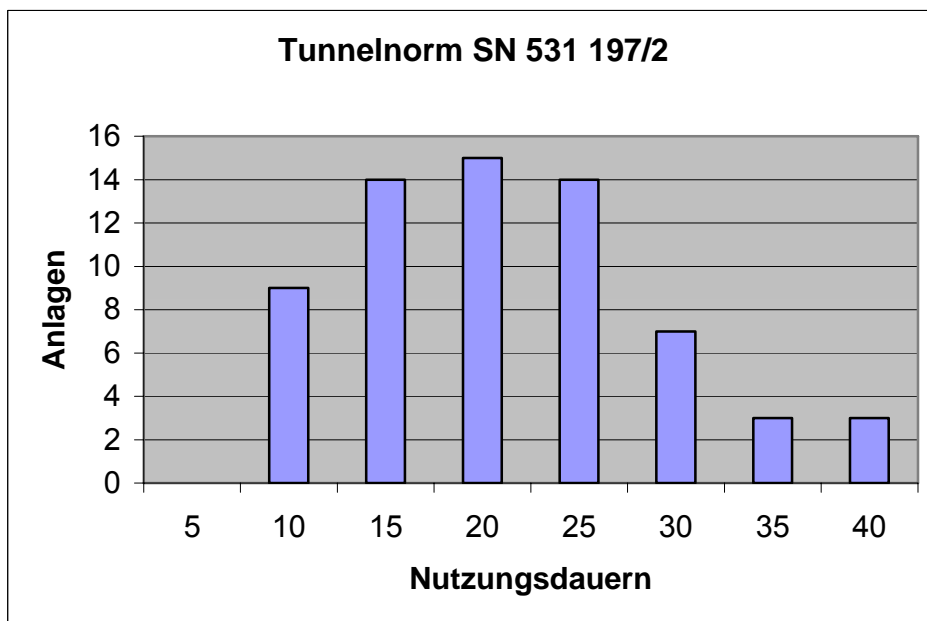


Abb. 11 Typische Nutzungsdauern gemäss der Tunnelnorm SN 531 197/2 [7]

Der Vorschlag in der Tunnelnorm zeigt ein sehr regelmässiges Bild; mit einem klaren Schwergewicht bei 20 Jahren.

In diesem Zusammenhang ist ein Vergleich des gewichteten arithmetischen Mittels⁴ von Interesse. Folgende Zahlen ergeben sich:

⁴ Das arithmetische Mittel wurde wie folgt berechnet: Nutzungsdauern*Häufigkeit/Summe der Häufigkeiten

$$m = \frac{\sum_i N_i * H_i}{\sum H_i}$$

m: Gewichtetes arithmetisches Mittel, N: Nutzungsdauern, H: Häufigkeiten

Datenquelle	Mittel [Jahre], ermittelt über Arithmetische Gewichtung	Interpolation
Tunnelnorm	21	
Elektrizitätswerk	17	16
Kanton1	15	17
Kanton2	18	19
Kanton3	17	18
Kanton4	25	23
Durchschnitt	19	19

Abb. 12 Die Tabelle zeigt die durchschnittlichen Werte der Nutzungsdauern

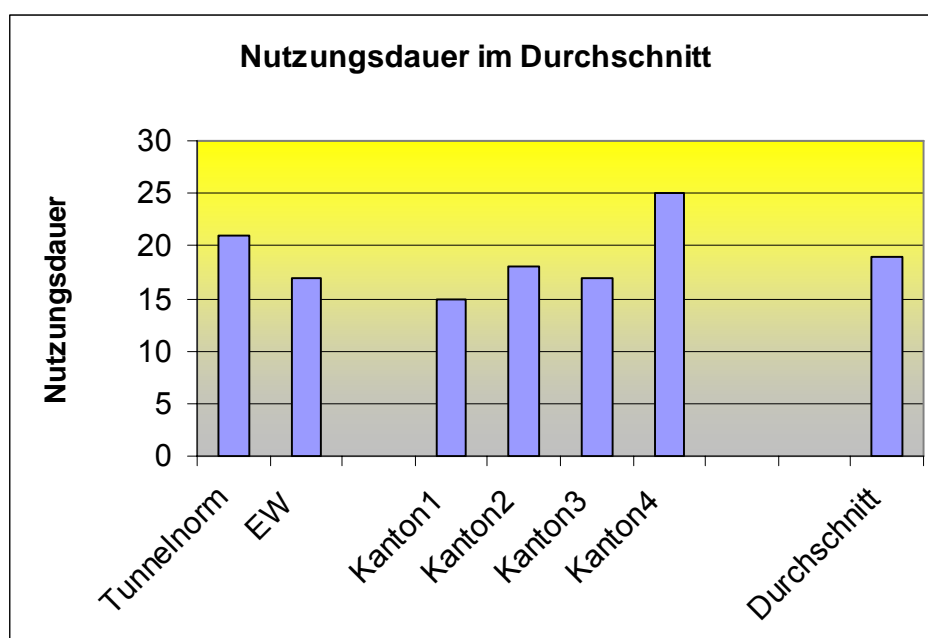


Abb. 13 Nutzungsdauern im Durchschnitt

Eine Wertung der erhobenen Daten ergibt folgendes Fazit, wobei eine gewisse statistische Relevanz durchaus als gegeben betrachtet werden kann, da die ausgewählten Quellen einen relevanten Anteil am Schweizer Tunnelpark besitzen.

- Technische Ausrüstungen werden durchschnittlich zwischen 15 und 25 Jahren ersetzt.
- Ein grosser Teil von Anlagen wird bereits nach 15 Jahren ersetzt (in drei Kantonen beobachtet), obwohl die Lebensdauer der Anlagen im Durchschnitt grösser sein dürfte.
- Es besteht ein Unterschied in der Nutzungsdauer-Beurteilung zwischen den Kantonen (oder übergeordnete Gründe führen zu frühem Anlagenersatz).
- Die durchschnittliche Nutzungsdauer, welche von der Tunnelnorm vorgeschlagen wird, entspricht einem guten praktischen Mittelwert.



6. Systembetrachtung bez. Alterungsprozess, dessen Beeinflussungsmöglichkeit und Zustandsdiagnostik

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden ausgewählte Anlagen und Systeme einer vertieften Analyse unterworfen.

Die Wahl fiel auf die Anlagen:

- Leuchtmittel
- Leittechnik
- Energiekabelanlagen
- Glasfaserkabelanlagen

Folgende Kriterien führten zu dieser Wahl:

- Das tunnelspezifische Umfeld führt für diese Anlage zu neuen Erkenntnissen.
- Das Wissen aus "bereits erforschten" Anwendungsgebieten (Gebäudetechnik, Industrie, etc.) kann nicht einfach auf das Tunnelumfeld übertragen werden.
- Er ist noch wenig aufbereitetes Wissen vorhanden, gilt für allem für Glasfaserkabelanlage.

6.2 Leuchtmittel im Tunnel

6.2.1 Einleitung

Die Beleuchtung ist seit den grossen Tunnelkatastrophen auch ins Zentrum von Sicherheitsüberlegungen gerückt: Die Beleuchtung hat eine bedeutende Funktion zur Verhinderung von Unfällen, und nach dem Eintritt von Ereignissen erfüllt sie Orientierungs- und Sicherheitsaufgaben. Es ist deshalb entscheidend zu wissen, wie sich die Leuchtdichte mit dem Alter der Anlage verändert und bei welchem Zeitpunkt ein Ersatz angezeigt ist. Auch hier ist demzufolge zwischen Lebensdauer („maximale Brenndauer“) und der sinnvollen und angemessenen Nutzungsdauer (und dem lampenspezifischen Ausdruck „Nutzlebensdauer“, vgl. unten) zu unterscheiden.



Um die Nutzungs- und Lebensdauer von Leuchtmitteln zu beurteilen, ist es notwendig, sich vertieft mit dem entsprechenden Verhalten vertraut zu machen. Es wird deshalb einleitend detailliert auf die heutige Lampentechnologie eingegangen. Die Beleuchtungssteuerung wird nur am Rande behandelt; es erscheint angemessen und zielführend, vor allem den „kurzlebigen“ Teil einer Beleuchtungsanlage, welcher zudem der unfreundlichen Umgebung der Tunnelröhre ausgesetzt ist, mit Priorität zu behandeln. Die Steuerung einer Beleuchtung unterscheidet sich im Alterungsverhalten nicht grundsätzlich von anderen elektronischen Steuerungen.

6.2.2 Generelle Anforderungen an Tunnelbeleuchtungsanlagen

Die Tunnelbeleuchtung muss den hohen Anforderungen, die besonders am Tage auftreten, genügen. Das vornehmliche Ziel der Beleuchtung von Strassentunneln ist es, dem sich dem Tunnelportal nähernden Fahrer bei der Einfahrt und Durchfahrt durch den Tunnel genügende Sicht zur sicheren Fahrt zu verschaffen. In der Norm wird gefordert, dass folgende zwei Bedingungen erfüllt werden:

- Gewährleistung der objektiven Sicherheit
Der Fahrer muss in der Lage sein, ihn gefährdende Objekte in der Tunneleinfahrt aus genügender Distanz zu erkennen.
- Gewährleistung der subjektiven Sicherheit

Wenn die Beleuchtung in der Tunneleinfahrt ungenügend ist, nimmt der Fahrer das Tunnelportal als schwarzes Loch wahr und füllt sich entsprechend unsicher. Dies kann zu unerwarteten Reaktionen und damit zu erhöhten Unfallrisiken führen.

Um den Anforderungen zu genügen, werden je nach Tunnelstrecke unterschiedliche Leuchtenanordnungen bzw. Leuchtentypen verwendet. Bei den Leuchten werden unterschiedliche Arten von Leuchtmittel eingesetzt.

Folgende Lampenarten werden im Wesentlichen verwendet:

- Leuchtstofflampen T26 58W (teilweise 36W)
- Natriumdampfhochdrucklampen 400/250/150/100W

Leuchtstofflampen mit einem Rohrdurchmesser von 16mm und Induktionslampen werden in der vorliegenden Arbeit nicht besprochen, sind aber der Vollständigkeit halber in den folgenden Tabellen mit aufgeführt, da sie in Einzelfällen im Einsatz sind.

Lampentyp	Lichtstrom [lm]	Lichtstromausbeute [lm/W] 25°C (35°C)	Farbtemperatur [K]	Farbwiedergabestufe	Temperaturabhängigkeit	Dimmbarkeit
Osram T26 36W	3200	100	3000 bzw. 4000	1B	ja	1-100%
Osram T26 58W	5200	104	3000 bzw. 4000	1B	ja	1-100%
Osram T16 80W	6150	77 (88)	3000 bzw. 4000	1B	ja	1-100%
Master SON-T PIA Plus 100W	10'500	105	2000	4	nein	50-100%
Master SON-T PIA Plus 150W	16'500	110	2000	4	nein	50-100%
Master SON-T PIA Plus 250W	32'000	128	2000	4	nein	50-100%
Master SON-T PIA Plus 400W	55'000	138	2000	4	nein	50-100%
Master QL 85W	6'000	71	3000 bzw. 4000	B	nein	nein
Master QL 165W	12'000	72	3000 bzw. 4000	1B	nein	nein

Abb. 14 Übersicht Lampentypen und Eigenschaften

6.2.3 Gesamtsystem Leuchte

Das Leuchtmittel ist Bestandteil (eine Teilkomponente) eines Gesamtsystems, bestehend aus Betriebsgerät, Leuchtenkörper und Leuchtmittel (die Beleuchtungssteuerung wird hier nicht betrachtet). Die Aussagen von Herstellern über die Lebensdauer von Leuchtmitteln in Tunnelanlagen beruhen darauf, dass optimale Betriebsbedingungen für das Leuchtmittel herrschen. Nur Leuchten und Betriebsgeräte, die für die besonderen Einflüsse, die in einem Tunnel herrschen, ausgelegt sind, können für das Leuchtmittel die geforderten Betriebsbedingungen einhalten. Daher muss die Leuchte für thermische, mechanische, elektronische Einflüsse sowie Umwelteinflüsse, wie Feuchte oder Schadstoffe, ausgelegt sein.

Thermische Einflüsse: Wärmehaushalt / Wärmeentwicklung innerhalb der Leuchte kann zu einem Wärmestau führen

Mechanische Einflüsse: Erschütterungen durch von LKW's verursachten Windstößen, und auch bei der Reinigung

Elektronische Einflüsse: Störungen innerhalb des Netzes und Störungen, die von aussen induziert werden

Elektrische Einflüsse: Netzschwankungen



Umwelteinflüsse: Feuchtigkeit, Schadstoffe

6.2.4 Definition Lebensdauer eines Leuchtmittels

Bezüglich der Lebensdauer von Leuchtmitteln existieren unterschiedliche Begriffe, die im Markt je nach Lampentyp und Hersteller zur Anwendung kommen. Aus diesem Grund sind im folgenden Abschnitt die wichtigsten Definitionen aufgeführt. Die Lebensdauer einer Lampe ist ein wesentliches Gütekriterium bezüglich Lampenqualität und Wirtschaftlichkeit einer Beleuchtungsanlage. Es ist zwischen mittlerer Lebensdauer und der Nutzlebensdauer zu unterscheiden.

Mittlere Lebensdauer

Die mittlere Lebensdauer ist der Mittelwert der elektrischen Lebensdauer (Überlebensrate) einer Anzahl Lampen, die unter genormten Bedingungen betrieben werden. Sie ist erreicht, wenn mindestens 50% aller Lampen noch funktionstüchtig sind (50% Ausfall).

Nutzlebensdauer

Die Nutzlebensdauer ist dann erreicht, wenn der verbleibende Anlagenlichtstrom 70 bzw. 80% des anfänglichen Lichtstroms (neue Lampen, 100 Stunden eingebrannt) beträgt. Die Nutzlebensdauer berücksichtigt Frühaustritte und den Lichtstromrückgang der Lampe. Der Nutzlebensdauer bei Leuchtstofflampen liegt ein Schaltzyklus von 3 Stunden (165 Minuten ein und 15 Minuten aus) zugrunde. Bei Hochdrucklampen ist der Schaltzyklus auf 12 Stunden (11 Stunden ein und 1 Stunde aus) festgelegt. (Bei Leuchtstofflampen können die Herstellerangaben folglich nicht direkt übernommen werden; im Tunnel sind Leuchtstofflampen praktisch ausschliesslich für die Durchfahrtsbeleuchtung im Einsatz und unterliegen keinem EIN/AUS-Schaltzyklus.)

Die Nutzlebensdauer hängt von einer Reihe von Einflussgrössen ab, z.B. von der Schalthäufigkeit, von dem verwendeten Betriebsgerät, der Fertigungscharge etc. Die Messungen der Nutzlebensdauer erfolgen nach den Vorgaben der IEC-Publ. 60081. Um eine genauere Aussage über die Nutzlebensdauer zu erhalten, müssen die beiden Einflussgrössen Ausfall von Leuchtmitteln und Lichtstromrückgang näher betrachtet werden.

6.2.5 Eigenschaften der Leuchtmittel

6.2.5.1 Leuchtstofflampen

Leuchtstofflampen zeichnen sich durch eine gute Lichtstromausbeute aus (vgl. untenstehende Graphik). Auf Grund des im Vergleich zu den Hochdruck-Natriumdampflampen niedrigeren Lichtstroms sind die auftretenden Leuchtdichten an der Lampe gering. Die Farbwiedergabe ist gut, somit las-

sen sich Farben, die zur Kennzeichnung von Bereichen und Sicherheitseinrichtungen verwendet werden, gut erkennen und vereinfachen die Orientierung im Tunnel. Die Temperaturabhängigkeit der Leuchtstofflampen lässt sich durch Wahl von optimierten Lampen weitestgehend ausschliessen. Durch den geringen Lichtstrom pro Lampe ist eine hohe Anzahl von Leuchten notwendig, um die geforderten Leuchtdichten im Tunnel zu gewährleisten. Die Leuchten werden in der Regel als Lichtband montiert. Durch diese Anordnung der Leuchten kann eine sehr gleichmässige Ausleuchtung erfolgen.

Von den Herstellern wird in den Produktunterlagen die Nutzlebensdauer der Lampe angegeben und bezieht sich auf die oben genannten Messbedingungen. Diese Angabe allein lässt nur wenig Aufschluss über das Verhalten der Lampe über die Betriebsstunden zu. Daher müssen die Kurven "Lebenserwartung in Abhängigkeit zu den Betriebsstunden" und "Lichtstromverhalten in Abhängigkeit zu den Betriebsstunden" von den Herstellern angefragt werden.

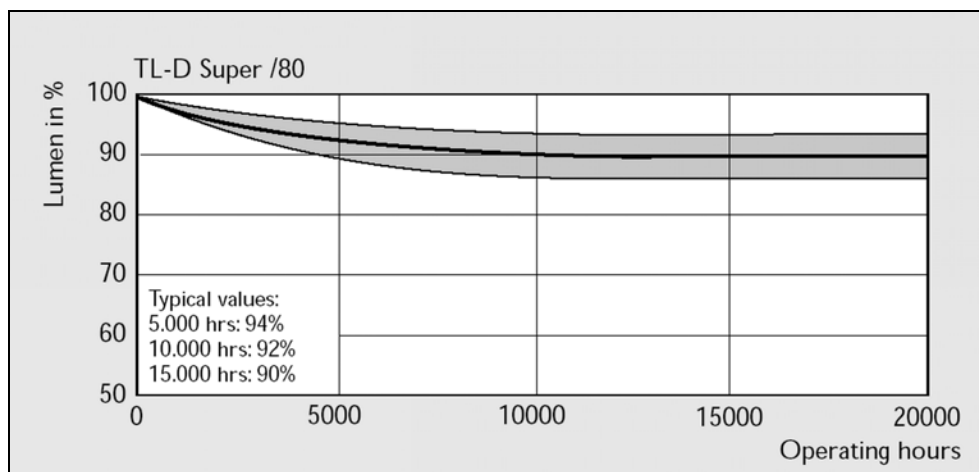


Abb. 15 Lichtstromverhalten über die Betriebsstunden (Quelle: Philips)

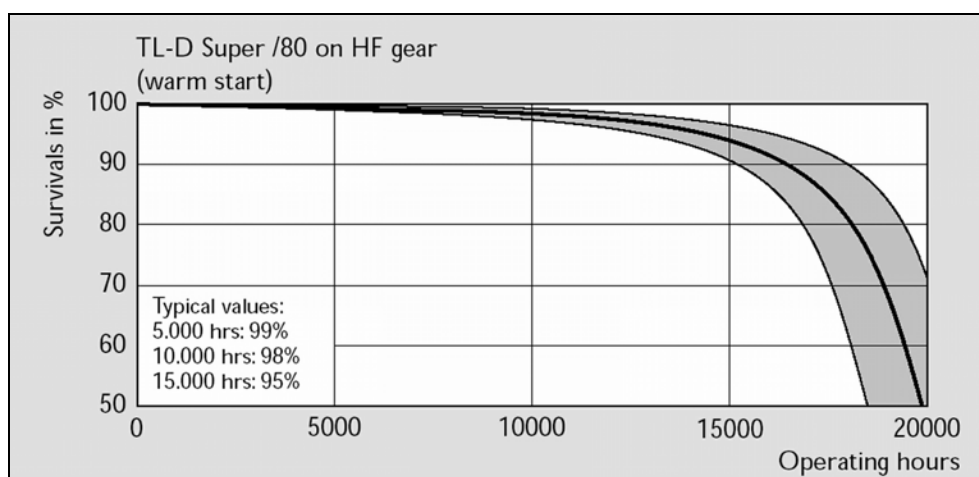


Abb. 16 Ausfall bezogen auf die Betriebsstunden (Quelle: Philips)

Durch Multiplikation beider Werte erhält man die Nutzlebensdauer der Lampe. Daraus ergibt sich dann eine Nutzlebensdauer von 16'000 Brennstunden (Annahme: Verwendung von elektronischem Vorschaltgerät mit Warmstart).

Im Tunnel wird die Beleuchtung wenig geschaltet, dies hat positive Auswirkung auf die zu erwartende Lebenserwartung der Lampen. Die folgende Grafik zeigt die mittlere Lebensdauer in Abhängigkeit zur Schalzhäufigkeit. Bei immer geringeren Schaltzyklen bzw. keiner Schaltung wird die Kurve zu einer Geraden, die sich der maximal zu erwartenden Lebensdauer immer weiter annähert.

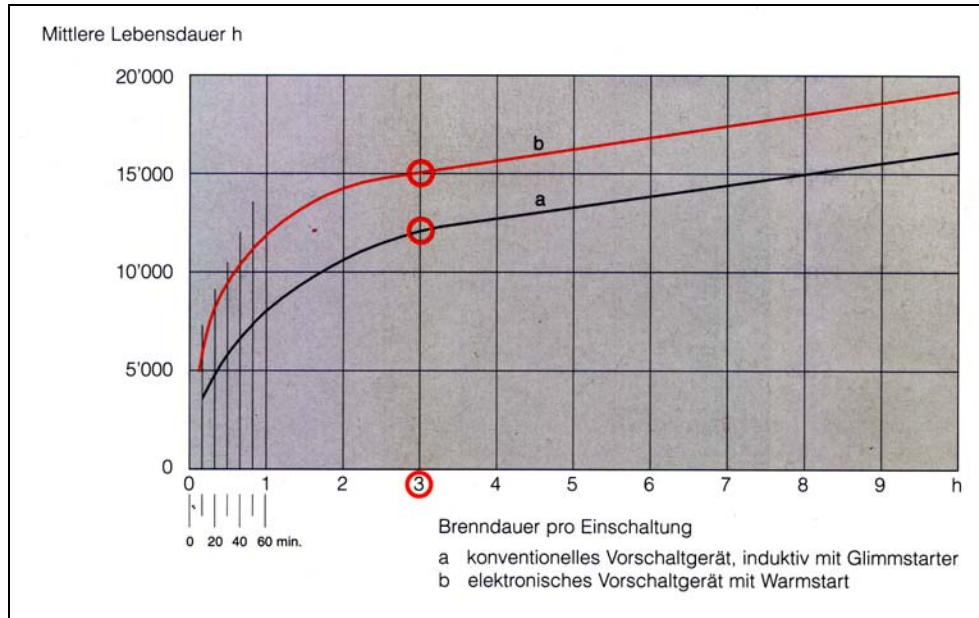


Abb. 17 Einfluss der Schaltungshäufigkeit auf die mittlere Lebensdauer (Quelle: Osram)

Aus diesem Grund geben die Hersteller für den speziellen Einsatz im Tunnel eine Nutzlebensdauer von 30'000 Std. an. Diese Werte beruhen auf Erfahrungen der Lampenhersteller. Nach Angaben von Betreibern werden bis zu 40.000 Std. erreicht.

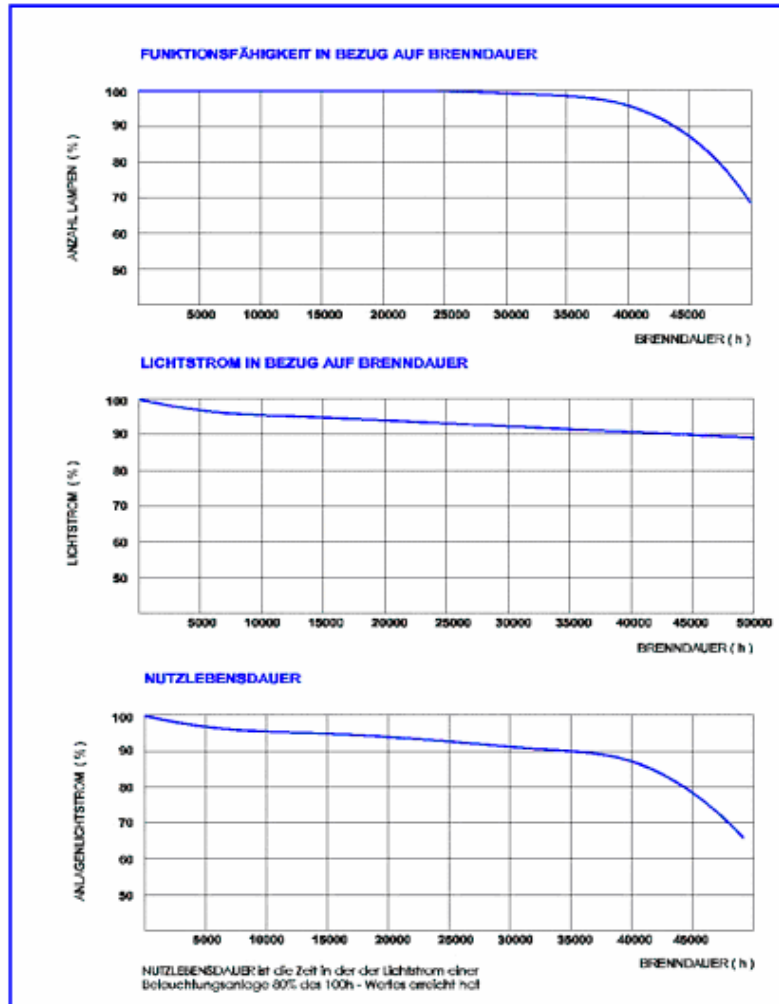
6.2.5.2 Spezielle Leuchtstofflampen mit langer Lebensdauer

Von einigen Herstellern wurden spezielle Leuchtstofflampen entwickelt, die eine besonders hohe Nutzlebensdauer aufweisen. Das Erreichen dieser hohen Lebensdauer ist auf eine besondere Kathodentopf-Konstruktion und einer speziellen Schutzschicht zwischen Leuchtstoffpulver und Glaskolben zurückzuführen. Die unter Normbedingungen betriebene Leuchtstofflampe weist eine Nutzlebensdauer von 43'500 Std. auf. Im Tunnelleinsatz (keine Schaltung) wird von dem Hersteller eine Nutzlebensdauer von ca. 55'000 Std. angegeben. Diese Lampen setzen sich in Tunnelanwendungen immer mehr durch.



AURA

AURA LONG LIFE LEUCHTSTOFFLAMPEN Ø 26 mm
LUMINETTE-LL STUFE 1B 18W 36W 58W
SCHALTUNG: EVG (Warmstart) IEC/EN 60081 3 h - SCHALTRHYTHMUS



AURALIGHT 06-2000

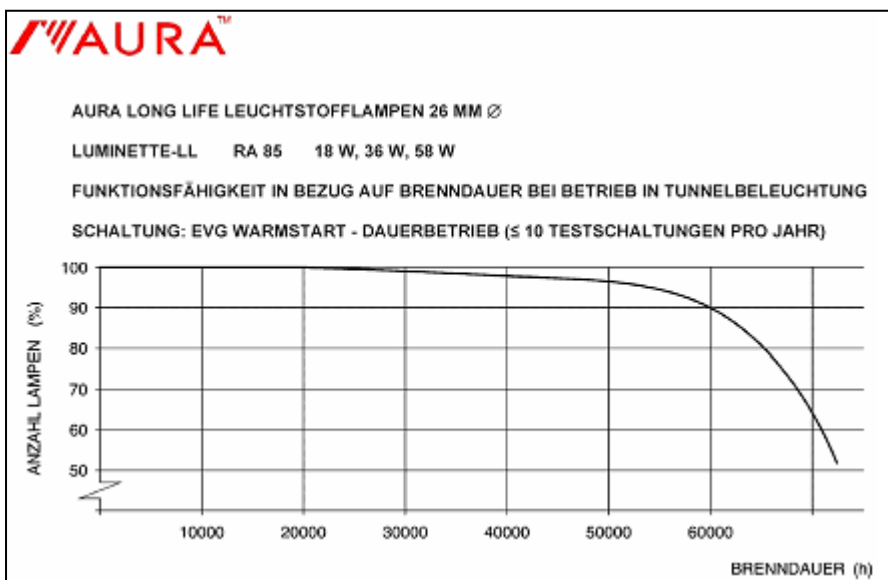


Abb. 18 Verhalten von langlebenden Leuchtstofflampen (Quelle: AURA)

6.2.5.3 Wahl des Betriebsgerätes

Wird die Beleuchtungsanlage geschaltet, ist die Wahl des Betriebsgerätes von grosser Bedeutung. Die Lampe wird je nach Betriebsgerät beim Zünden unterschiedlich stark beansprucht, was sich in der Lebenserwartung widerspiegelt. Aus diesem Grund sollten Leuchten die häufig geschaltet werden, mit einem EVG (mit Warmstart) ausgestattet werden. Die oben genannten Nutzlebensdauern gelten in diesem Fall nicht mehr, da sie nur für den Betrieb ohne Schaltung gelten.

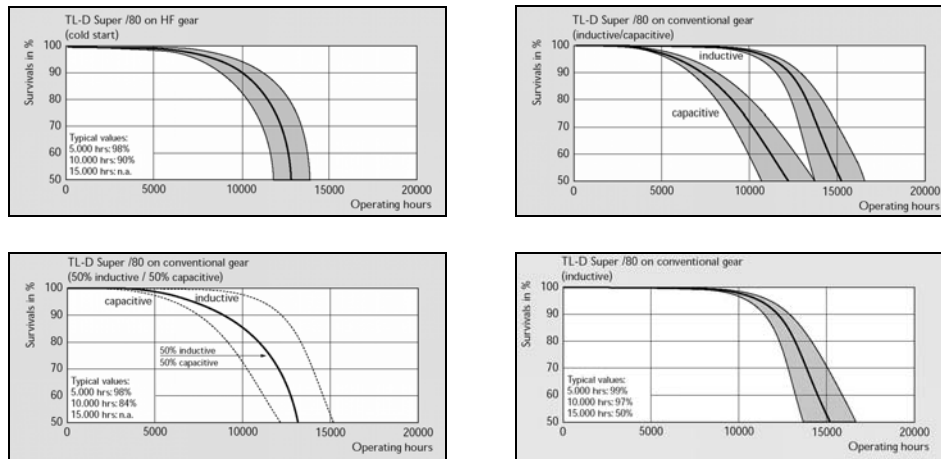


Abb. 19 Lebensdauer in Abhängigkeit vom verwendeten Betriebsgerät (Quelle: Philips)

6.2.5.4 Dimmverhalten

Das Dimmen von Leuchtstofflampen ist ohne Probleme in einem Bereich von 3-100% möglich. Das Dimmen oder das Schalten in vorbestimmten Stufen hat in den meisten Fällen keine negative Auswirkung auf die Lebensdauer der Leuchtmittel. Die Geräte müssen jedoch für den speziellen Einsatz im Tunnel geeignet sein.

6.2.6 Natriumdampfhochdrucklampen

Natriumdampfhochdrucklampen werden im Tunnel in verschiedenen Wattagen eingesetzt (400/250/150/100W). Je nach Leistungsklasse haben die Lampen eine gute bis sehr gute Lichtstromausbeute. Der Gesamtlichtstrom liegt je nach Wattage zwischen 10'500-55'000lm pro Lampe. Durch die breite Auswahl an Lampen bzw. Lichtströmen ist es möglich, auf die unterschiedlichen Zonen zu reagieren. Mit den höheren Wattagen kann, unter Berücksichtigung der Gleichmässigkeit, ein langer Streckenzug mit einer geringen Anzahl von Leuchten beleuchtet werden. Auch im Bereich der Tunneleinfahrt, wo hohe Leuchtdichten notwendig sind, werden Natriumdampfhochdrucklampen eingesetzt. Als Nachteil kann die schlechte Farbwiedergabe dieser Leuchtmittel sowie die Eigenschaft genannt werden, dass nach Einschalten der Lampe erst nach einer Anlaufzeit von ca. 4 min der volle Lichtstrom zur Verfügung steht. Nach Abschaltung ist eine Wiederzündung erst nach kurzer Abkühlung möglich. Bei Defekt einer Lampe wird zudem die Gleichmässigkeit stark beeinträchtigt.

Bei den Natriumdampfhochdrucklampen hat in den letzten Jahren ein Generationswechsel stattgefunden. Die heutzutage eingesetzten Leuchtmittel weisen folgende Charakteristika auf:

- Ein optimierter Gestellaufbau absorbiert Erschütterungen und sorgt für eine sichere Lagerung des Brenners. Ausfälle in Folge von Erschütterungen werden vermieden.
- Gasverluste werden vermieden
- Exaktere Positionierung der Elektroden
- Höheren Lichtstrom im Vergleich zur Standardlampe

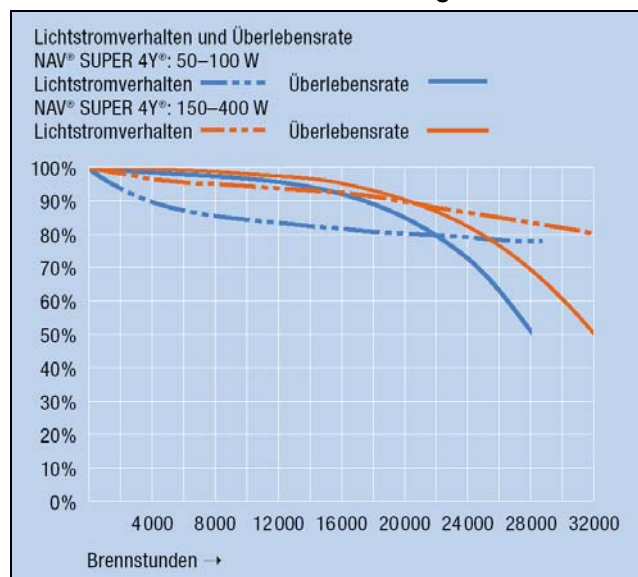


Abb. 20 Lichtstromverhalten und Überlebensrate, Schaltzyklus von 3 Stunden (Quelle: Osram)

Diese Optimierungen wurden in Hinblick auf die Vorschriften im europäischen Raum vorgenommen, die eine Kontrolle der Leuchten alle vier Jahre vorschreibt. Bei dieser Kontrolle kann gleichzeitig auch ein Leuchtmittelwechsel erfolgen. Die Leuchtmittel sind somit auf eine Nutzlebensdauer von vier Jahren ausgelegt (entspricht 16'000 Brennstunden). Die Standardlampen wiesen eine Nutzlebensdauer von 12'000 Brennstunden auf.

Die Hersteller geben für den speziellen Einsatz im Tunnel wie bei den Leuchtstofflampen eine Nutzlebensdauer von 30'000 Std. an. Die höhere Nutzlebensdauer ist wieder darauf zurückzuführen, dass keine Schaltung der Lampe erfolgt. Diese Werte gelten nur für die Innenstrecke. Im Bereich der Einfahrtsbeleuchtung, wo durch gezieltes Schalten von Leuchtengruppen die Leuchtdichte im Tunnel an die äusseren Leuchtdichten angepasst werden, gelten diese Werte für die Lebensdauer nicht.

6.2.6.1 Dimmverhalten

Das Dimmen von Natriumdampfhochdrucklampen ist unter Beachtung gewisser Einschränkungen in einem Bereich von 50-100% möglich. Das Dimmen hat keine negative Auswirkung auf die Lebensdauer der Leuchtmittel. Grundsätzlich muss die Lampe mindestens 3 Minuten auf 100% betrieben werden, um anschliessend auf einen Wert von 50% herabgedimmt werden zu können.



6.2.7 Betriebszustand (Zustandserfassung) von Leuchtmitteln

Der Betriebszustand von Leuchtmitteln ist am einfachsten über die Brennstunden herzuleiten. Mit Hilfe dieser Angabe kann ein Gruppenersatz getätigt werden. Als Nachteil ist anzumerken, dass keine Informationen bzw. Nutzlebensdauererläufe für den speziellen Einsatz im Tunnel zur Verfügung stehen. Somit erfolgt der Austausch unter Umständen zu früh, nämlich nach dem vom Leuchtmittelhersteller angegebenen Zeitraum - auch wenn die Beleuchtungsanlage noch über 80% des Gesamtlichtstroms liefert und die geforderten Leuchtdichten noch erreicht werden.

6.2.7.1 Leuchtdichtemessung im Tunnel

Leuchtdichtemessungen eignen sich nur bedingt, um eine Aussage über den Betriebszustand der Leuchtmittel zu erlangen. Für eine solche Messung müsste immer die Tunnelanlage in einen reproduzierbareren Zustand versetzt werden, um dann die Messung durchzuführen. So müssen die Tunnelflächen immer auf ihren Reflexionsgrad überprüft und gegebenenfalls gereinigt werden. Ansonst können falsche Rückschlüsse auf den Zustand der Beleuchtungsanlage erfolgen, wenn schon mehrere einzelne Lampen vor dem geplanten Gruppenersatz gewechselt wurden.

Die Leuchtdichtemessung ist folglich möglich, setzt jedoch ein Messkonzept voraus, das obige Anforderungen berücksichtigt. Bei Tunneln, die in regelmässigen Abständen gereinigt werden, z.B. 2mal pro Jahr, sind Messungen unmittelbar nach der Reinigung denkbar.

6.2.7.2 Spannungsmessung

Eine exakte Aussage über den Betriebszustand eines Leuchtmittels liefert nur eine direkte Spannungsmessung an der Lampe. Da eine solche Messung immer direkt an der Leuchte durchgeführt werden muss, ist diese Methode relativ umständlich und lässt sich in der Praxis nur schwer umsetzen. Daher ist sie für den Tunnelleinsatz nicht zu empfehlen.

6.2.8 Betriebsgeräte

Bei elektronischen Vorschaltgeräten und Transformatoren ist die angegebene mittlere Lebensdauer auf die maximal zugelassene Umgebungstemperatur t_a oder die maximale Gehäuse-Oberflächentemperatur t_c bezogen. Bei den meisten Herstellern ist die maximale T_c -Punkt-Temperatur gleichzeitig auch der für die Nennlebensdauer von 50'000 Betriebsstunden geltende Grenzwert. Die Geräte können dauernd mit dieser Temperatur betrieben werden. Aus diesem Grund ist das thermische Verhalten der Leuchten von dem Leuchtenhersteller zu prüfen und auf das elektronische Vorschaltgerät abzustimmen. Der Temperaturbereich am T_c -Punkt liegt bei einem Standard EVG zwischen -15°C und $+50^\circ\text{C}$. Da ein enger Zusammenhang zwischen maximaler Betriebstemperatur und Nennlebensdauer besteht, kann durch die optimale Wahl des Temperaturbereiches auch die

Nennlebensdauer beeinflusst werden. Aus diesem Grund ist es möglich, mit für den Tunnelleinsatz optimierten EVG's und der Beschränkung des Temperaturbereichs auf maximal +50°C eine Nennlebensdauer von 80'000 Std. zu erreichen.

Grundsätzlich sind im Tunnel nur vibrationsfeste EVG's zu verwenden. Die Messresultate einer Vibrationsmessung sollten vom Betreiber angefordert werden.

6.2.9 Fazit

Die optimale Nutzungsdauer kann wie folgt festgelegt werden:

- Messung der Brenndauer
- Berücksichtigung der Schaltzyklen
- Eventuell: Messung der Leuchtdichte gemäss obigen Regeln

Die untenstehende Graphik zeigt einen Vergleich von Herstellerangaben mit aktuellen Erfahrungswerten.

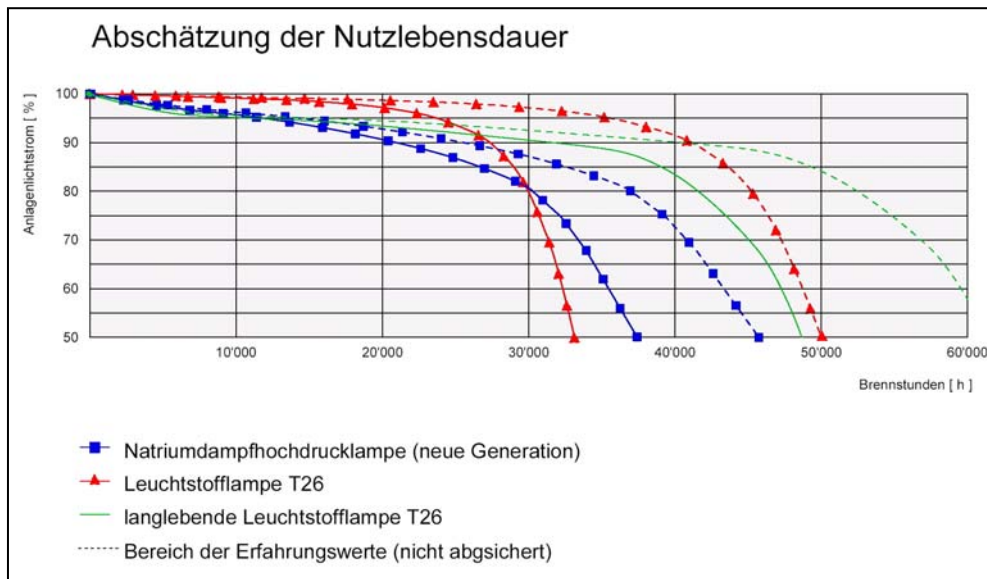


Abb. 21 Durchschnittliche Nutzungsdauern (unterbrochene Linien bezeichnen die Erfahrungswerte)

Mit obiger Darstellung kann der Lebenszyklus der Lampen relativ gut bestimmt und damit der Zeitpunkt eines Gesamtersatzes festgelegt werden. Nach etwa 20 Jahren ist auch der Ersatz des Lampengehäuses inkl. Aufhängung zu terminieren; dieser Zyklus hängt stark von den äusseren Bedingungen wie Temperatur, Feuchte, Salzeintrag ab.

6.3 Leittechnik

6.3.1 Einleitung

Ein wichtiger Anteil der Tunnelsysteme bilden "Leitsysteme", welche auch als "Übergeordnete Leitsysteme", "Betriebsleitsysteme", etc. bezeichnet werden. Diese Systeme haben die früheren "Fernwirkssysteme" ersetzt und erlauben dem betriebsführenden Personal die Überwachung der technischen Anlagen, wie auch die Behandlung von Alarmen, Störungen, Meldungen. Die Anlagen bestehen im Wesentlichen aus elektronischen Netzwerken mit verteilten Rechnern zur Datenerfassung und –Weiterleitung sowie zur Visualisierung dieser Informationen in Leitzentralen. Leitsysteme stehen im Ruf, verhältnismässig teuer zu sein und ausserordentlich kurze Lebenszyklen aufzuweisen. Sie tragen deshalb wesentlich zu den Kosten der Tunneltechnik bei.

Aus oben erwähnten Gründen ist es notwendig, im Rahmen dieser Forschungsarbeit vertieft auf diese Systeme einzugehen.

6.3.2 Prinzipielle Struktur von Leitsystemen

Das folgende Bild zeigt eine übliche, hier stark vereinfachte Struktur eines Leitsystems.

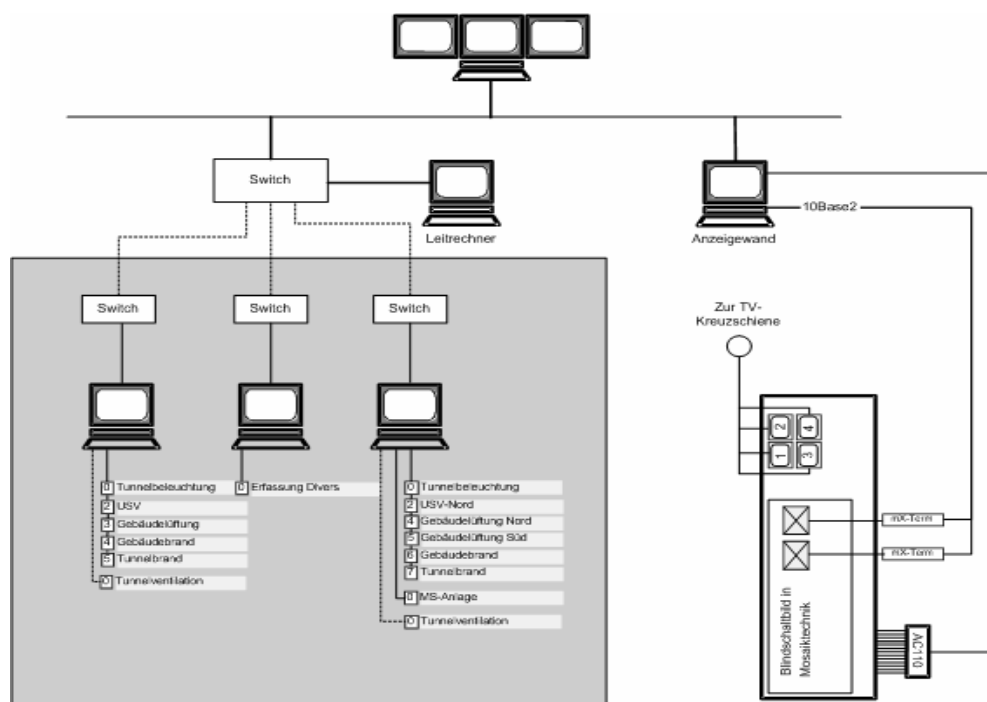


Abb. 22 Muster-Struktur eines Leitsystems

Betrachtet man die obige Darstellung, wird rasch ersichtlich, dass ein Leitsystem – stark vereinfacht ausgedrückt – aus elektronischen Geräten, Rechnern und Kommunikationsverbindungen (optisch und galvanisch) besteht. Fast sämtliche aktive Komponenten sind letztlich rechnerartig: PCs, Switches/Hubs/Router⁵, Protokollwandler, speicherprogrammierbare Steuerungen, Anzeigegeräte. (Grosse Anzeigegeräte wie Projektoren, Rückprojektionssysteme o.ä. werden hier nicht betrachtet.) Die wesentlichen Unterschiede bestehen darin, dass gewisse aktive Komponenten bewegte Teile enthalten (Harddisks, Lüfter), andere nicht. Zudem sind vor allem Geräte mit relativ grosser Wärmeproduktion (Geräte mit heiss werdenden Elementen, so genannten "hot spots") einer grösseren Belastung ausgesetzt und erreichen deshalb nicht die üblichen Nutzungsdauern wie Geräte mit geringer Wärmezeugung.

6.3.3 Nutzungszyklen von Leitsystemen

Grundsätzlich hat die System-Architektur einen grossen Einfluss auf die Nutzungsdauer: als Teil des System-Design-Prozesses wird durch die Wahl der Architektur über die Art und Anzahl der aktiven Komponenten entschieden, und damit grosser Einfluss auf die Nutzungsdauer genommen. Es kann allgemein festgestellt werden, dass diese Kriterien im Planungsprozess eher im Hintergrund stehen und selten einen direkten Einfluss auf die Systemwahl ausüben.

Damit kann für die folgenden Betrachtungen von den heutigen (zumeist übergeordneten) Leitsystemen ausgegangen werden, die eine Vielzahl von Rechnern und aktiven Komponenten aufweisen.

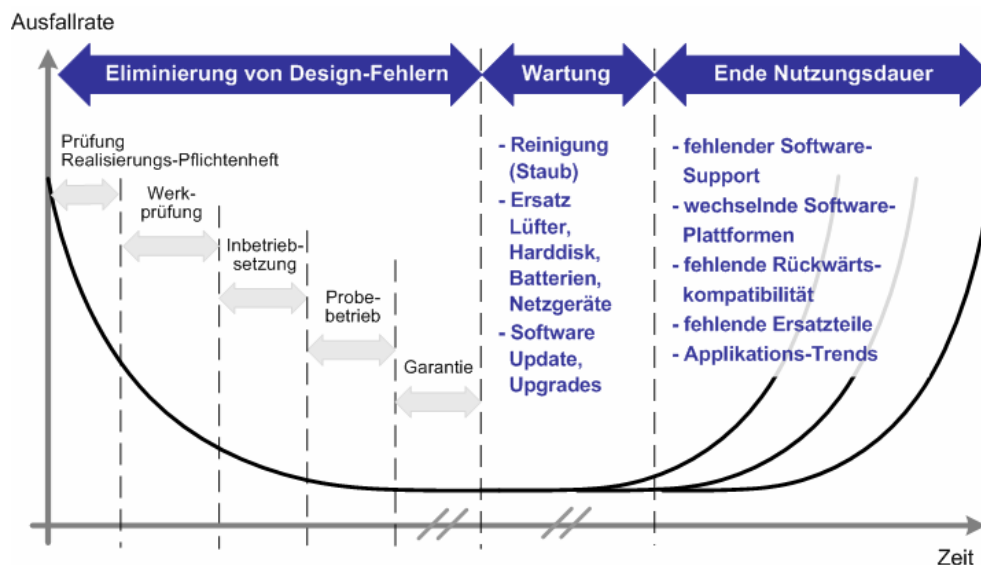


Abb. 23 Typischer Lebenszyklus von Leitsystemen

⁵ Switches, Hubs, Router sind aktive Komponenten, welche für den Betrieb von Netzwerken notwendig sind.

Bei Leitsystemen führen häufig übergeordnete Gründe zum Ersatz von gesamten Anlagen:

- Änderung von Anforderungen
- Einbindung von neuen Applikationen, welche auf dem bestehenden System nicht lauffähig sind oder zu Instabilitäten führen
- Vergrößerung des elektromechanischen Anlageparks
- Technologie-/Versions-Wechsel
- Fehlende Ersatzteile und Support, Kündigung des Supports durch Lieferanten

Untersucht werden sollen jedoch die Ausfälle von Elementen der Leitsysteme, wodurch ein frühzeitiger Ersatz eingeleitet wird, vor allem dann, wenn eine Häufung von Ausfällen zu einem "unzumutbaren Betriebszustand" führt.

Vorerst sind die Ausfallursachen zu betrachten; folgende Unterscheidung ist hilfreich:

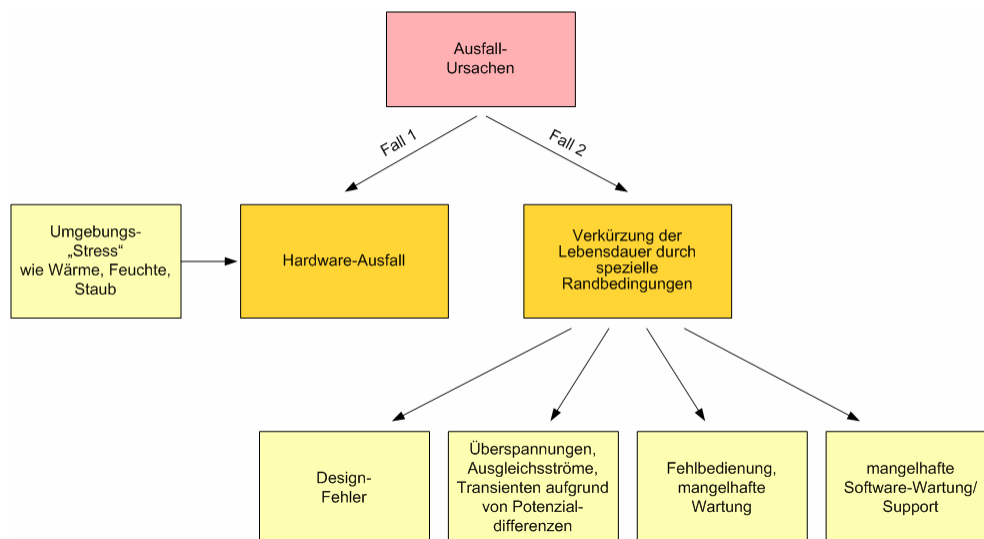


Abb. 24 Unterscheidung der Ausfall-Ursachen

Dadurch ergibt sich in der Regel eine Kombination von Fall 1 und Fall 2: Ein Anlageteil hat eine intrinsische Verfügbarkeit (MTBF), basierend auf den Standard-Umgebungsparametern wie 20...25 Grad Umgebungstemperatur, mittlere Feuchte von 40...60 %, keine Erschütterungen. In der Realität unterliegen jedoch die meisten Systeme speziellen Randbedingungen, wodurch die Verfügbarkeit herabgesetzt wird.

Folgende Elemente können aus Sicht der Ausfall-Charakteristik unterschieden werden:

- Aktive Komponenten ohne bewegte Teile, ohne hot spots
- Aktive Komponenten mit bewegten Teilen, wie PCs, Server
- Verbindungselemente wie Stecker, "Steckdosen"

- Passive Komponenten wie Kommunikationsleitungen (Glasfasern, separates Kapitel)
- Software

6.3.3.1 Aktive Komponenten ohne bewegte Teile

Aktive Komponenten bestehen im Wesentlichen aus Halbleitern in mehr oder weniger integrierter Form sowie weiteren passiven Komponenten wie Kondensatoren, Induktivitäten in eher geringerer Anzahl.

Sofern aktive Komponenten keine "hot spots" oder empfindliche Elemente wie spezielle Chips enthalten, kann festgehalten werden: Sie weisen eine für derartige Elemente typische Lebensdauer von >15 Jahren auf.

Im Zentrum der Betrachtungen müssen jedoch die Halbleiter stehen; sie machen den Grossteil der Komponenten aus und unterliegen verschiedensten Fehlermechanismen, die insbesondere von äusseren, extrinsischen Einflüssen abhängig sind. Folgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über die physikalischen Ursachen der Fehler:

Fehlerursachen	Aktivierungsenergie E[eV]
Ionen-Kontaminierung	1.0-1.4
Verletzung der Oxidlayer	0.3
Elektromigration in den Anschlusspunkten	0.5-1.0
Intermetallische Problemstellen Gold-Aluminium	0.8-1.0
Korrosion von Alu-Verbindungspunkten	0.5-1.0
Harddisk-Aktuatoren, Piezo-Steller (Steuerung/Stellglied des Lese-Kopfes)	1.27

Abb. 25 Darstellung der physikalischen Ursachen von Ausfällen bei Halbleitern sowie Angaben zur Aktivierungsenergie (vgl. Anhang sowie [18] ...[21])

Ohne im Detail auf diese Zusammenhänge eingehen zu wollen, kann man Folgendes festhalten: Verschiedene Fehlermechanismen werden durch äussere Einflüsse – vor allem Temperatur – stark beeinflusst, da sie mittlere bis hohe Aktivierungsenergien aufweisen (> 0.8 eV). Dadurch ist die beschleunigte Alterung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur relevant.

6.3.3.2 Aktive Komponenten mit bewegten Teilen

In diese Gruppe fallen typischerweise die rechnerartigen Geräte, welche Harddisks, Lüfter für Gehäuse oder Lüfter für hoch-integrierte Chips enthalten. Diese Teile sind einem natürlichen Verschleiss unterworfen und führen zu erhöhten Ausfallraten. Verbreitet sind in Geräten der unteren Preisklasse auch Elemente wie z.B. das Netzgerät knapp dimensioniert. Dadurch entstehen hohe Temperaturen und die bekannten Fehlermechanismen mit geringerer Verfügbarkeit.

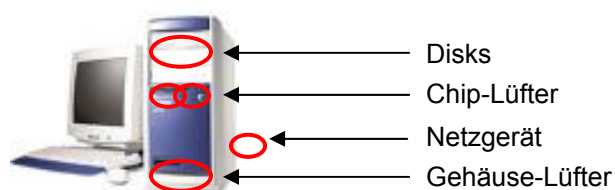


Abb. 26 Standard-PCs eignen sich nur bedingt für professionelle Anwendungen: Problemstellen sind Lüfter, Dimensionierung der Netzgeräte, Disks

Bezüglich Nutzungsdauer können folgende Elemente unterschieden werden:

- Elektronische Printkarten ohne Hot Spots
- Spezielle Speicher-Chips mit hoher Speicherdichte
- Kühl-Lüfter für Chips (zumeist für Prozessoren)
- Lüfter für Gehäuse
- Disks, vor allem Harddisks (HDD)
- Software

Technische Komponente	Fehlermechanismus	Typ. Nutzungsdauer
Elektronische Printkarten ohne Hot Spots	Statistische Verfügbarkeit der Komponenten, Einfluss der äußeren Faktoren	> 15 a
Spezielle Speicher-Chips mit hoher Speicherdichte	Erhöhte Temperatur und dadurch beschleunigte Alterung	< 10 a
Kühl-Lüfter für Chips (zumeist für Prozessoren)	Verschleiss von bewegten Teilen, zusätzlich Einfluss der Umgebung (Feuchte, Staub, Erschütterung)	<= 5 a
Lüfter für Gehäuse	dito	> 5 a
Disks, vor allem Harddisks (HDD)	dito	5 ... 7 a
Software	Software „altert“ an sich nicht, das Auftreten von Fehlern ist abhängig von der Design-Qualität.	---
Software-Version	Eine Software-Version ist u.U. nicht mehr brauchbar, wenn der Support eingestellt wird. Eine Beschränkung der Lebensdauer findet jedoch durch die Einbettung der Software in eine sich verändernde Umgebung statt.	Applikation: 3...5 a Betriebssysteme: < 10 a

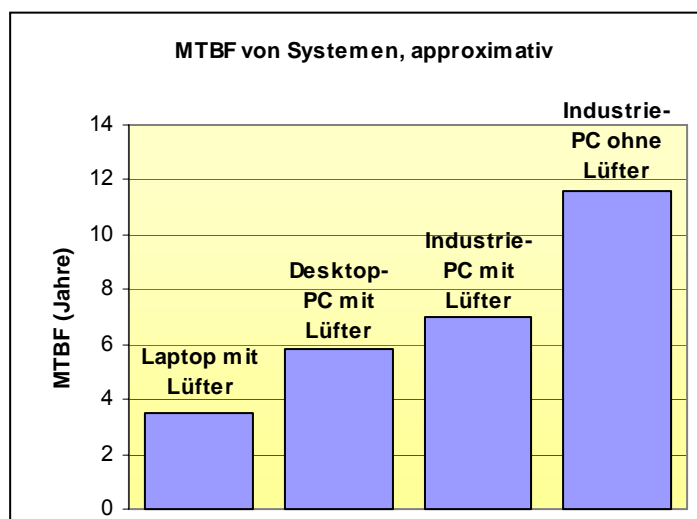
Abb. 27 Typische Nutzungsdauern mit Betrachtung der Fehlermechanismen (Empirische Werte und Angaben von Herstellern)

Für einen PC ist also höchstens während 5 Jahren mit einem problemlosen Betrieb zu rechnen. Sind die Geräte relevant, kann die Verfügbarkeit mit zusätzlichen Massnahmen erhöht werden: Redundante Lüfter, präventiver Lüfter-Austausch, Temperatur-Überwachung, Event-Log-Erfassung bez. Mehrfach-Zugriff auf die Harddisk, Ersatz-PC an Lager.

Der Anwender hat in der Regel jedoch nicht die Möglichkeit, die einzelnen Komponenten eines Gerätes zu beurteilen; er kann aber trotzdem die Nutzungsdauer beeinflussen, in dem er den obigen Erkenntnissen Rechnung trägt (am Beispiel eines PC's):

- Niedrige Umgebungstemperatur in technischen Räumen verlängert die Nutzungsdauer. Als Daumenregel gilt: Überschreiten von 70% der vom Hersteller angegebenen Maximaltemperatur verkürzt die Nutzungsdauer merklich
- Standard- oder Low-Cost-PC's haben geringere Verfügbarkeiten (MTBF) bei Lüftern, Netzgeräten, Harddisks als "Industrie-PC's"
- Hochintegrierte PC's (wie Laptops) sind temperaturmässig höher belastet und haben geringere Verfügbarkeiten
- Vermeiden von Erschütterungen und mechanischen Schockbelastungen

Ein meist vernachlässigter Umstand ist die Tatsache, dass der Kühlung von aktiven Leittechnik-Komponenten zu wenig Beachtung geschenkt wird. Folgende Fälle sind zu beachten: Allfälliger Ausbau der Anlage, dadurch erhöhte Konzentration, erhöhte Dichte von aktiven Komponenten, nicht adäquate Art der Kühlung, zu enge Räumlichkeiten (Rack-Organisation), nicht geeignete Wahl der Hardware-Ausführung selbst. Obwohl weitverbreitet Anlagen mit aktiver Belüftung eingesetzt werden, sollte falls immer möglich natürliche Lüftungszirkulation eingesetzt werden; denn eine aktive Fremdbelüftung bringt die Nachteile einer zusätzlichen kritischen Komponente „Lüfter“ und den zusätzlichen Eintrag von Verschmutzungen (Staub und Feuchte), welche die Zuverlässigkeit der Platinen und IC-Anschlüsse bedingt durch Kriechströme (bis hin zu Kurzschlüssen) negativ beeinflussen.



Industrie-PC's sind eine prüfenswerte Option. Diese Geräte sind speziell für den industriellen Einsatz optimiert und werden nach Kundenwunsch konfiguriert. Ausführungen mit/ohne Lüfter sind erhältlich sowie auch für höhere Temperaturen ausgelegte Geräte.

Abb. 28 Vergleich von verschiedenen PC-Typen und deren entsprechender

6.3.3.3 Verbindungselemente/Stecker/Kupplungen

Verbindungselemente sind passive Elemente wie Netzwerkstecker („RJ-45“), Steckdosen. Diese Elemente sind passiv und unterliegen vergleichbaren Fehlermechanismen wie bereits dargestellt. Hauptsächlich Fehlerursachen sind:

- Unsachgemässe Installation: Dies ist der grösste Einflussfaktor, welcher zu Beginn der Nutzung auftritt. Fehler treten zumeist in den ersten Betriebsmonaten auf.
- Staub-, Schmutzeintrag im Betrieb
- Mechanische Veränderungen durch äussere Einflüsse
- Physikalisch-chemische Prozesse ausgelöst durch äussere Einwirkungen wie Temperatur, Feuchte, Erschütterung, Gase (pH-Werte der feuchten Gase sind entscheidend für die Korrosion)

Die obige Zusammenstellung zeigt auf, dass in diesem Bereich vor allem äussere Einflüsse bestimmend sind. Werden diese gebührend beachtet, ist die Verfügbarkeit der Verbindungselemente nicht bestimmend für die Nutzungsdauer von Gesamtanlagen.

In diesem Fall kann von Nutzungsdauern von über 20 Jahren ausgegangen werden.

6.3.4 Fazit

Die Nutzungsdauer von Leitsystemen kann nicht gesamthaft beurteilt werden, es ist eine Betrachtung der wichtigsten operativen Komponenten nötig. Allerdings kann man festhalten, dass ohne besondere Aufmerksamkeit bei der Auswahl der Anlageteile und ohne Berücksichtigung der Stressfaktoren (wie Umgebungstemperatur, Feuchte, Erschütterung, Gase) bereits nach 3...5 Jahren die Nutzungsdauer erreicht wird.

Die Temperatur ist stets einer der wichtigsten Stressfaktoren. Es gilt folgende grobe Regel:

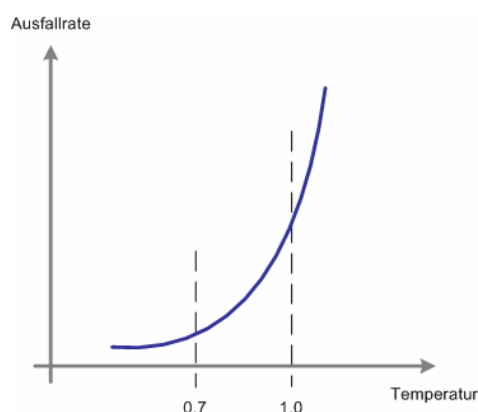


Abb. 29 Grosser Anstieg der Ausfallrate bei überschreiten von 70% der maximal zulässigen Umgebungstemperatur

Obige Darstellung besagt, dass bei aktiven Komponenten mit Herstellerangaben von max. 40 Grad C eine Umgebungstemperatur von 28 Grad C nicht überschritten werden sollte.

Man erreicht so z. B. für den Harddisk-Aktuator (der „Lesekopf“ der Harddisk) bei stetiger Betätigung mit 3KHz bei einer Betriebstemperatur von 25°C eine zu erwartende Lebenszeit von 6.4 Jahren (1.27eV Aktivierungsenergie). Die Temperatur ist also der wichtigste Alterungsfaktor. Bei diesem Beispiel erreichen wir für +10°C eine Beschleunigung der Alterung um den Faktor 4.

Bestimmend für die Nutzungsdauer sind die bewegten Teile, Software-Versionen und die Komponenten, welche einer hohen Temperatur ausgesetzt sind.

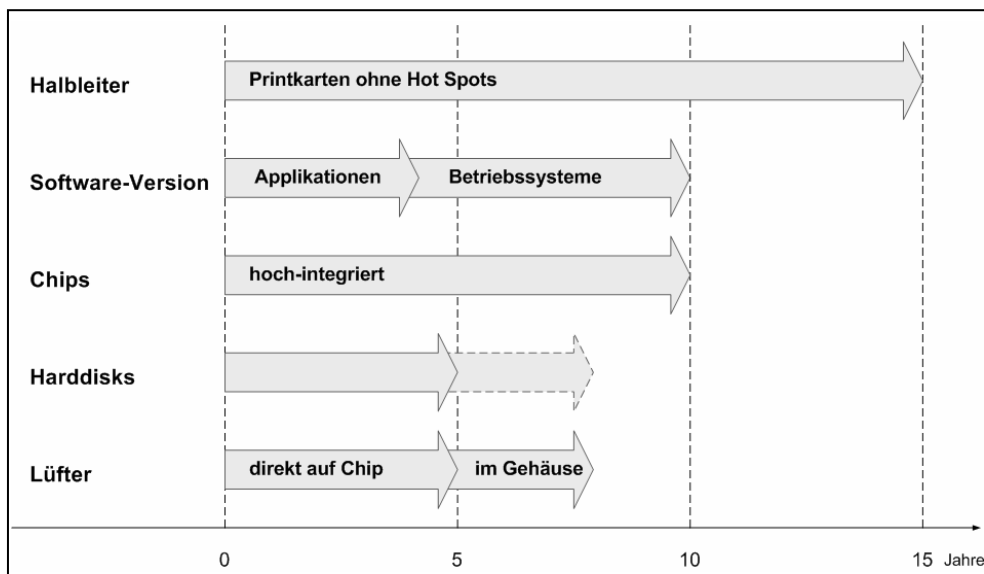


Abb. 30 Durchschnittliche Nutzungsdauern ohne Stressfaktoren

Die obigen Werte markieren den Punkt in der Badewannen-Kurve, wo die Ausfallrate ansteigt. Dieser Punkt verschiebt sich hin zu kürzeren Nutzungsdauern, wenn Stressfaktoren wie erhöhte Temperatur auftreten. Der Einfluss kann über Methoden wie Arrhenius [Anhang] oder daraus abgeleiteten Faustregeln quantifiziert werden.



6.4 Energie-Kabelanlagen

6.4.1 Einleitung

Bei der Nutzung von Kabelanlagen wird in der Regel mit einer operativen Lebensdauer von 30 bis 40 Jahren ausgegangen. Kabelsysteme nehmen demzufolge im Gesamtanlagenbau eine besondere Stellung ein:

- Baulich gelten die Kabel als ein verteiltes System, wobei verschiedenste Trassen verwendet werden: Betonrohrblöcke, Pritschen, Oberflächenmontage usw. kommen für die Verlegung in Frage, je nach Schutzgrad und baulichen Gegebenheiten
- Funktional beeinflussen diese Kabelsysteme übergeordnete Systeme wie Lüftung, Signalisation, Beleuchtung, Energieversorgung
- Die Lebensdauer ist markant höher, als die "Peripherie"

Der Ausfall von solchen Kabeln kann vor allem durch einen Kurzschluss ausgelöst werden, so dass direkte und indirekte Folgeschäden nicht auszuschliessen sind: Potentialverschleppung und Schädigung von empfindlicher Elektronik. Bei Instandhaltungsüberlegungen müssen korrekterweise solche Ereignisverkettungen auch mitberücksichtigt werden.

Zudem ist es strukturell und baulich nicht immer wirtschaftlich möglich, die übliche Redundanz n-1 zu erreichen. Dies gilt sowohl für die elektrische Redundanz als auch für den zweiten örtlich unabhängigen Weg der Erschliessung; hier würde man von einer Trassen-Redundanz sprechen mit dem höchsten Sicherheitswert. Diesem Aspekt ist bereits bei der Planung das notwendige Gewicht zu geben; dort wo die Redundanz aber nicht möglich ist, sind die notwendigen Dispositionen zu treffen (bei der Verwendung des gleichen Trassees spricht man von einer „quasi Redundanz“, falls der elektrische Pfad doppelt ausgeführt wird).

Diese Art von „Komponenten“ - welche ein verteiltes System ausmachen - verdienen deshalb ein besonderes Augenmerk: Für die Betriebsführung als auch für die Unterhaltsstrategie ist deshalb eine entsprechend abgestimmte Zustandserfassung von grosser operativer Wichtigkeit. Je grösser die Betriebsspannung, desto wichtiger wird die Kenntnis über den Alterungszustand. Werden zugleich hohe Betriebstemperaturen erreicht oder aber hat man Kenntnis über die Strombelastungsdauer (Peakwerte) bzw. Kurzschlussfälle im Betrieb (extrinsischer Energieeintrag), so ist durch die Überlagerung der Alterungsprozesse ganz besonders eine Zustandserfassung angezeigt.

Zu beachten ist, dass zwischen der Kunststoffalterung und der Temperatur ein signifikanter Zusammenhang besteht. Dieser wird gut von der Arrhenius-Gleichung beschrieben, welcher die Beobachtung zugrunde liegt, dass eine chemische Reaktion bei Erhöhung der Temperatur um 10° C rund doppelt so schnell abläuft (vgl. detaillierte Informationen im Anhang).

Im weiteren stehen spezifische Diagnosemethoden über den aktuellen Funktionszustand zur Verfügung, die über den Alterungszustand der Kabel und damit über die Erfassung des Alterungszustandes eine Aussage machen können. Damit wird es auch möglich, über die Restlebensdauer des Kabelsystems einen Aufschluss zu erhalten [16].

6.4.2 Kabeltypen PE, XPE

In den 40-er Jahren wurden in der Schweiz die ersten 20kV-Mittelspannungskabel hergestellt. Die Fortschritte in der Kunststoffverarbeitung haben dann in den 60er Jahren bei Neuinstallationen zum Verbau von polyethylenisolierten (PE) Mittelspannungskabeln geführt und die vorherrschenden Massekabel abgelöst. Doch es zeigte sich, dass nach wenigen Betriebsjahren weltweit gehäufte Störfälle auftraten, die bis anhin nicht erklärt werden konnten. In den 60er und 70er Jahren wurden verschiedenste Untersuchungen eingeleitet, die vor allem von japanischen Erkenntnissen geprägt waren. Es wurde festgestellt, dass die Alterung in einer ersten Phase der natürlichen Werkstoffalterung entspricht, welche nach einem bestimmten Zeitpunkt von einer forcierten Alterung abgelöst wird, vor allem bestimmt durch den Feuchtigkeitsgrad, der elektrische Feldbelastung und der Wärme. Es sind die drei Grössen sowie allfällige mechanische Beeinflussungen, welche die Reaktionsart „Chemismus“ und die Intensität der Reaktion und das Vorkommen von Radikalen stark mit beeinflussen. Das Versagen liegt wesentlich in einer Makro- bzw. Mikrostrukturänderung in der dielektrisch hochbelasteten Isolationsstrecke (Entladungsvorgänge in Mikrohöhlräumen). [16]

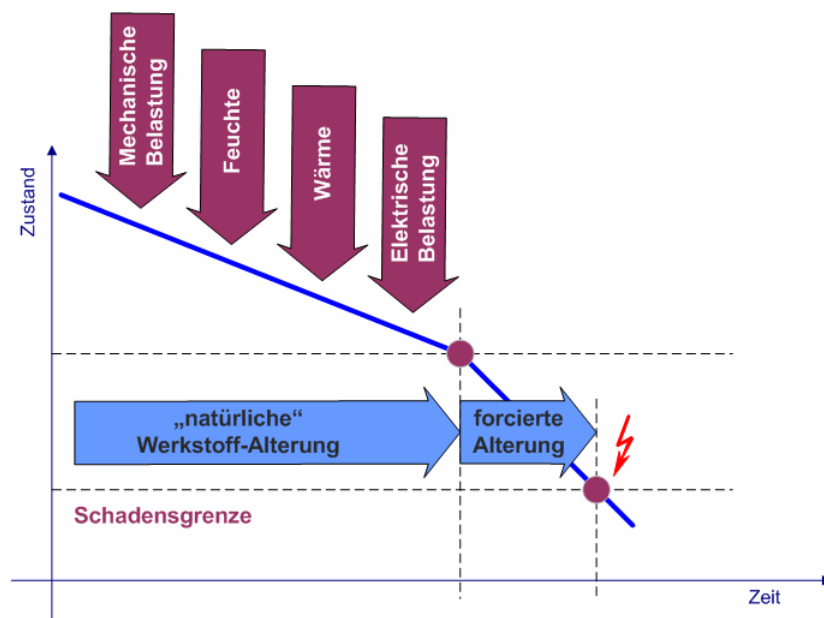


Abb. 31 Forcierte Alterung wird durch verschiedene Einflussgrössen ausgelöst

Diese Hohlräume – auch als Water tree in der Fachliteratur bekannt – zeigen erhöhte dielektrische Verluste (feststellbar durch Wechselstrom-Testverfahren) und eine unterschiedliche Leitfähigkeit als das Basismaterial auf. Sie beeinflussen die Raumladungsbildung – ähnlich wie im Halbleiter –



und können geometriebedingt zu stark überhöhten mikroskopischen elektrischen Feldgradienten führen, die ihrerseits zu einem elektrischen Überschlag führen können (bedingt durch positiv rückgekoppelte Prozesse).

6.4.3 Kabeltypen (Öl-Papier-Isolation)

Bei Öl-Papier isolierten Kabeln ist ein vollständig anderes Alterungsverhalten zu beobachten. Die Reinheit der Ausgangsmaterialien (auch während des Zusammenbaus) des Kabels spielt eine wichtige Rolle, so auch der Feuchtegehalt, welche die Restleitfähigkeit stark beeinflusst; bei erhöhter Feuchtigkeit ist der Verlustfaktor und die Wärmeerzeugung stark ansteigend. Dies kann der wesentliche Grund des Versagens eines beschädigten und/oder gealterten Kabels einleiten, da bei der Erwärmung die Isolation sich stark ausdehnt; bei der Abkühlung können Hohlräume (Vakuolen) entstehen, da der Bleimantel vorgängig und irreversibel verformt wurde. In diesen Vakuolen können, da sich hohe Feldstärken ausbilden, Ionisationen und Entladungen entstehen, welche die Stoffeigenschaften wesentlich negativ beeinflussen. Es zeigt sich eine starke Erhöhung des Verlustfaktors; die Wahrscheinlichkeit für einen harten Durchschlag (Kurzschluss) wird dabei stark erhöht.

6.4.4 Diagnostik des Kabelzustandes und Bewertung der Isolationsgüte, Beispiel Mittelspannung

Für die Betreiber der Infrastruktur der Mittelspannungskabel ist es hinsichtlich des Betriebes und der Investitionsplanung nun bedeutsam, den aktuellen Zustand ihrer Netze mittels verschiedener Methoden im Zeit- und / oder Frequenzbereich genauer zu kennen bzw. zu erfassen. Damit können gefährliche Änderung von charakteristischen Isolationseigenschaften, wie z. B. Polarisationsverhalten, Raumladungsverteilungen und Verlustfaktoränderungen detektiert werden [8]. Allerdings können solche Prüfungen nicht während des Kabelbetriebs durchgeführt werden. Der erhöhte Aufwand lohnt sich also dann, wenn bereits Anzeichen beschleunigter Alterung bestehen (z.B. detektiert durch Temperaturmessung) oder bereits Defekte bei vergleichbaren Kabeln vorgekommen sind.

Isotherme Relaxationsstromanalysen (Methoden im Zeitbereich) [9, 10]

Hier wird nach einer Konditionierung des Kabelabschnittes (Spannungsanlegung, Kurzschluss) der exponentiell abklingende Depolarisationsstrom gemessen. In den charakteristischen Exponenten findet man Koeffizienten, welche über den Zustand der Kabelanlage Auskunft geben können. Hat man zu verschiedenen Lebenszeiten den "Fingerprint", so lässt sich über die Abweichungen von entsprechenden kritischen Größen eine Aussage über die Raschheit der Alterung und über den Zustand eine Aussage machen. Dies wird umso genauer, je mehr korrelierte Erfahrungswerte vorliegen.



Wiederkehrspannungsmethode (Zeitbereich)

Wie der Name schon sagt, wird die wiederkehrende Spannung hochohmig gemessen, nachdem das Kabel durch eine hohe Gleichspannung 5 Minuten formiert und kurzzeitig (2s) kurz geschlossen wird. Die Höhe der Wiederkehrspannung in Abhängigkeit der DC Formierspannung (Linearität) kann über den physikalischen Zustand etwas aussagen.

Verlustfakturmessung (Frequenzbereich)

Eine Prüfung des Verlustfaktors bei der technischen Frequenz 50Hz sagt wenig aus über den aktuellen Zustand; dieser "Fingerprint" ist nicht genügend, angesichts der komplexen dielektrischen Prozesse. Hingegen hat sich gezeigt, dass bei sehr tiefen Frequenzen (0.1 Hz) diese Grösse stark auf alterungsbedingte Änderungen reagiert, da langsame Prozesse der Depolarisation und Ionenwanderungen die Erscheinung beeinflussen. Die Prüfspannung liegt bei $1 \cdot U^\circ$ und $2 \cdot U^\circ$, bei welchen der Verlustfaktor verglichen wird.

Der Feuchtegehalt m_c – als wesentlicher Schadensparameter in einer Isolation – kann empirisch bei Kenntnis des Verlustfaktor-Minimums ermittelt werden, wobei man 3 Bereiche unterscheiden kann [11]:

Feuchtegehalt:

- $m_c < 0.5\%$, trocken, guter Zustand
- $0.5\% < m_c < 2\%$, mittlerer Zustand, periodische Überprüfungen angezeigt
- $m_c > 2\%$, schlechter Zustand, mit Schäden ist zu rechnen

6.4.5 Massnahmen zur Verhinderung frühzeitiger Ausfälle

Aufgrund der physikalischen Aufgabe und deren Prozesse im Dielektrikum (→ Isolationssystem), sind die folgenden Punkte im Betrieb besonders zu berücksichtigen:

- Es ist absolut zu vermeiden, die Kabel bei Übertemperatur zu betreiben (Überstromschutz).
- Am Kabelmantel dürfen keine Beschädigungen auftreten, so dass eine strikte Wasser/Feuchtigkeitsbarriere aufrechterhalten werden kann.
- Überspannungen jeglicher Art müssen absolut vermieden werden (restriktiver Überspannungsschutz, innere und äussere Überspannungen).
- Isolationsprüfungen sind periodisch vorzusehen, durch Einsatz von technischen Prüfmethode und Expertenwissen (pattern recognition).

Dadurch kann jederzeit der Funktionszustand sichergestellt werden; die natürliche und beschleunigte Alterung von Kabeln ist frühzeitig erkennbar.

Die Instandhaltungsplanung kann damit möglichst nah den physikalischen Gegebenheiten folgen.

Es resultiert eine höhere Systemverfügbarkeit, da notwendige Umschaltungen und Ersatz ordentlich geplant werden können. Ungeplante Massnahmen sollten dadurch vermeidbar sein und damit auch ein unkontrolliertes Schadensausmass.

6.4.6 Fazit

Energiekabelanlagen weisen generell sehr hohe Lebensdauern auf (>30 Jahre), so dass zumeist übergeordnete Gründe zum Ersatz führen. Im Sinne der Lebenszyklus-Betrachtung lohnt sich eine vertiefte Auseinandersetzung also nur, wenn spezielle Indikationen vorliegen, z.B.:

- Es haben sich bereits Ausfälle und/oder Kurzschlüsse ereignet
- Die Kabel sind besonderen Umweltbedingungen (z.B. Hitze, Feuchte) ausgesetzt (worden)
- Es sind ausserordentliche Betriebszustände vorgekommen (Hochstromlast!)

Die untenstehende Graphik veranschaulicht den Zusammenhang:

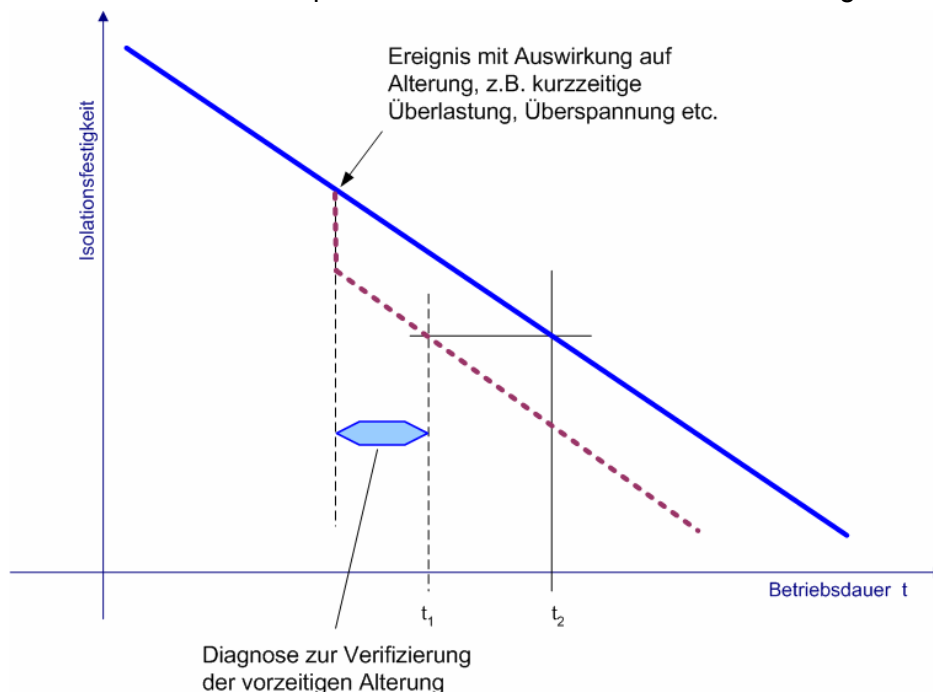


Abb. 32 Bei speziellen Ereignissen ist eine Diagnose zur Verifizierung einer allfälligen vorzeitigen Alterung angezeigt, $t_2 - t_1$ entspricht der vorzeitigen Alterung

In diesen Fällen sind diagnostische Massnahmen gemäss obigen Beispielen sinnvoll, weil damit ein drohender Ausfall möglicherweise erkannt werden kann. Sind die entsprechenden Kabel allerdings redundant verlegt, ist der beträchtliche Aufwand kaum zu rechtfertigen. Dafür ist eine Analyse (Kosten/Nutzen-Abschätzung) angezeigt.



6.5 Glasfaser-Kabelanlagen: Alterungsprozess und Kenngrössen

6.5.1 Einleitung

Ausgehend von der intrinsischen Lebensdauer der Glasfaser von ca. 120 Jahren und der praktischen Feldbeobachtung von neu verlegten Lichtwellenleiter (LWL)-Kabelanlagen vom zum Teil nur wenigen Monaten stellt sich ernsthaft die Frage, welche systematischen Einflüsse den Einbruch der Zuverlässigkeit so dramatisch werden lassen.

Am Beispiel der Glasfaser-Kabelanlagen wird exemplarisch aufgezeigt, dass es in diesem Fall nur sinnvoll ist, über Nutzungsdauern zu diskutieren, wenn die Zusammenhänge des Alterungsprozesses bekannt sind. Es wird deshalb im Folgenden ausführlich auf diese speziellen Zusammenhänge eingegangen. Dies wird als sinnvoll und zielführend erachtet, weil in den letzten Jahren in der Schweiz grosse LWL-Anlagen erstellt wurden – und das Wissen über diese Zusammenhänge noch nicht weit verbreitet ist.

6.5.2 Faktoren im Alterungsprozess

Grundsätzlich wird die Nutzungsdauer bzw. die funktionale Betriebszeit einer LWL-Übertragungsanlage durch die nachfolgenden drei Faktoren beeinflusst:

- Intrinsic Faktoren:

Oberflächenzustand der gezogenen Faser und Aufbau der Faser

Dichte und Tiefe von Mikrorissen, Anfälligkeit auf Spannungsrisskorrosion

- Extrinsic Faktoren:

Die aufzunehmende Belastung durch die Verlegung (Biegung, Torsion, Zug) - dynamisch zyklisch (Vibrationen, Eigenresonanzen) und statisch - und die klimatischen Randbedingungen, gegeben durch Temperatur, Feuchte, Gaszusammensetzung der Umgebungsluft

- Optische Faktoren:

Neu hinzu kommt die optische Belastung, welche bis zu einigen 100kW/cm² betragen kann: bedingt durch ein Versagen einer Kupplung kann sich ein wandernder Hotspot (einige Meter pro Sekunden) durch das ganze Netz ausbreiten, welcher örtlich repetitiv die Lichtwelleneigenschaften total irreversibel zerstört. Dieser Effekt wandert mit einigen Metern pro Sekunde durch das ganze LWL-Netz bis zur nächst gelegenen optisch-elektrischen Wandlung.

Die obigen Fehlermechanismen zeigen, dass nur durch die genaue Kenntnis der baulichen Qualität der Kabelanlage Aussagen über die mögliche Nutzungsdauer gemacht werden können. Eine ungenügende Verlegequalität führt zu beschleunigter Alterung.

(Im Anhang ist ein methodischer Ansatz zur analytischen Beschreibung der Alterung wiedergegeben.)

Eine zusammenfassende Grafik (nach dem Stressmodell) lässt erkennen, dass die statische Belastung stark die funktionale Lebensdauer beeinflusst.

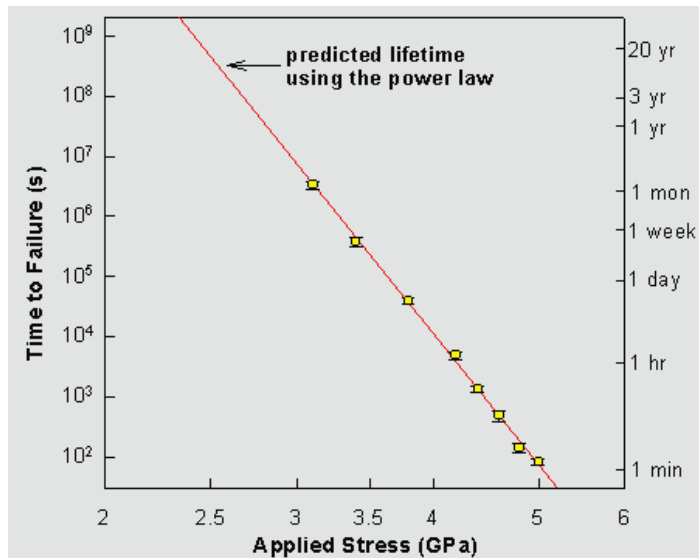


Abb. 33 Statische Belastung und Vorhersage der Lebensdauer einer Glasfaser [3]

Setzt man die Lebensdauer der Faser (als MTTF, Mean Time To Failure) in die folgenden Gleichungen der Fehlerbetrachtungen ein zur Berechnung der FIT (Failure in Time, 1 FIT entspricht 1 Ausfall innert 1 Mia Jahren), der Fehlerrate und der Überlebensrate, so erhält man eine interessante Größenordnung für die Abschätzung der Systemsicherheit.

Unter der Voraussetzung, dass die Belastung 2.5GPa nicht überschreitet, ergeben sich aus obiger Abbildung folgende Werte:

Lebensdauer: 20 Jahre

Fehlerrate 5.716 E-6 oder 5710 FIT

oder: In 99% der Fälle wird das System die ersten 10 Jahre überleben.

Im Falle einer nur 7% erhöhten statischen Last wird die Faser nur 3 Jahre überleben, 10 Jahre werden praktisch nicht mehr erreicht.

6.5.3 Folgerungen für Planung und Betrieb

Jede unnötige Last (z.B. durch elastisch/plastische Verformungen der Kabel) auf die Faser muss durch konstruktive Vorsichtsmassnahmen absolut vermieden werden.

Für die Verlegung in Nationalstrassenanlagen heisst dies:

- Vermeidung von Temperaturschwankungen durch Verlegung in Kabelrohren
- Vermeidung von Feuchte durch Verlegung in Kabelrohren oder durch spezielle Auslegung des Kabelaufbaus
- Gute mechanische Abstützung des Kabels bei Aufstiegen, Querungen, Anschlüssen, Endverteilern
- Beachtung der Biege-Vorschriften: minimal 15...20 mal Kabeldurchmesser

Man kann zeigen, dass bei gezielter Stressreduktion und Schutz der Faser vor Umwelteinflüssen eine markante Lebensdauererhöhung erreicht werden kann.

Stressreduktion	Suszeptibilitätsfaktor n (n ist eine empirisch ermittelte Material-Eigenschaft der Faser, welche einen Hinweis auf die Geschwindigkeit des Alterungsprozesses gibt: n=gross \cong langsame Alterung)	Faktor der Lebensdauererhöhung
80%	n= 20	16-fach
80%	n= 90	72-fach

Abb. 34 Stressreduktion mit gleichzeitiger Isolierung der Faser vor Umwelteinflüssen führen zu erheblichen Lebensdauererhöhungen

6.5.4 Planung im Hinblick auf hohe Nutzungsdauern

Es wurde oben gezeigt, dass die Nutzungsdauer von LWL-Kabelanlagen stark von verschiedenen Faktoren abhängt, welche einerseits beim Bau der Anlage, andererseits aber auch im Betrieb relevant sind.

Treten ungünstige Faktoren auf, welche die Lebensdauer und damit die Nutzungsdauer beeinträchtigen, hat dies auch einen Einfluss auf die Funktionalität der Anlage. Dies steht zwar nicht im Zentrum dieser Forschungsarbeit, soll aber am Rande aufgezeigt werden.

Bedingt durch Fehlstellen und eingefrorenen Stress werden mehr oder weniger grosse Abweichungen von den Idealgrössen verzeichnet, die auch

messtechnisch nachgewiesen werden können: die Grösse der Abweichungen sagen etwas über die Stabilität der Lebensdauer der Lichtwellenleiter aus.

Der physische Stress (mechanischer Druck längs und quer, Zugspannungen, Torsion, Vibration) bewirkt in aller Regel erhöhte Verluste und begünstigt nichtlineare Effekte. Zudem ist eine erhöhte Wahrscheinlichkeit des physischen Bruches zu verzeichnen. Zu kleine Biegeradien führen zu vielerlei übertragungstechnischen Einschränkungen: die Spannungsrisskorrosion wird dadurch gefördert, die Lebensdauer vermindert.

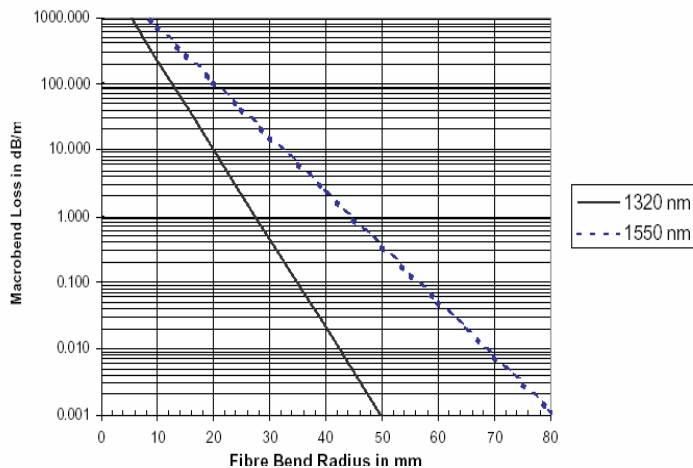


Abb. 35 Übertragungsverluste aufgrund von Biegungen, dargestellt am Beispiel von 2 typischen Wellenlängen (Quelle: Dr. G. Farrell, Dublin Institute of Technology)

6.5.5 Methoden zur Erkennung einer künftigen Nutzungseinschränkung

6.5.5.1 Zustandserfassung, mögliche Massnahmen während des Betriebes

Aufgrund der geschilderten physischen Schadensmöglichkeiten wird auch deutlich, dass entsprechende Messmethoden existieren, welche es erlauben, die Leistungsfähigkeit der verbauten LWL-Infrastruktur direkt oder indirekt zu beurteilen. Werden selektive Messungen in gewissen Zeitabständen durchgeführt, so lässt sich der funktionelle Zustand mit entsprechender Auswertung/Interpretation jederzeit gut beurteilen. Da die Nutzungsdauer der LWL-Anlagen je nach Zustand um Grössenordnungen von typischen Werten abweichen kann, ist es notwendig, die Kenngrössen für die Zustandsmessungen zu kennen.

Nachfolgend wird auf einzelne mögliche und empfohlene Messungen eingegangen.



6.5.5.2 OTDR (optical time domain reflectometrie)

Diese Art von Messungen gemäss EN 188'000 erlaubt es, eine *ortsaufgelöste Schadenserkennung* von Ereignissen zu messen. Zudem erfolgt bei bidirektionaler Messung eine Bestimmung der optischen Verluste dieser Ereignisse, welche sich zumeist in einer zusätzlichen Dämpfung äussern.

Es können folgende physikalische Grössen herausgelesen werden:

- zugeordnete Dämpfung in dB von diskreten Ereignissen
- Reflektionsanteile bis zu -65dB
- Längsdämpfung dB/km
- Exakte physikalische optische Längenbestimmung und Ortung von ausserordentlichen Ereignissen

Diese Messmethode und deren Interpretation kann über folgende Einwirkungen Auskunft geben:

- erhöhte Spleiss-, Steckerverluste
- Verschmutzungen auf Steckerendflächen durch erhöhte Reflektion
- Beschädigte Spleisse
- Bending, Beanspruchung auf Druck und Biegung
- Generelle Zunahme der Längsdämpfung mit Angabe des Ortes (Wassereinfluss, Druckstellen, in Abhängigkeit der Verlegequalität)

6.5.5.3 IL-Messung (Insertion Loss Messung)

Diese Messung dient zur Kontrolle der integralen Dämpfung der Strecke, also des optischen Budgets in dB. Diese Grösse gilt als eine der offensichtlichsten operativen Grössen.

6.5.5.4 PMD-Messung (Polarisations Mode Dispersionsmessung mit Interferometrie)

Diese Messung wertet die unterschiedlichen polarisierten Modengeschwindigkeiten aus. Aus den interferometrischen Grössen wird aufgrund einer Gauss'schen Kurve eine mittlere Zeit errechnet in ps, die der unterschiedlichen Signalankunft zugeordnet wird. Mit der Eingabe der genauen Länge wird ein integraler PMD-Koeffizient und durch weitere Berechnungen der Dispersionsanteil, als PMD 2. Ordnung ausgegeben.

Es werden folgende Grössen ausgegeben:

- Zeitdifferenz in ps (Phasendifferenz im Zeitbereich)
- Spezifischer PMD-Wert in $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$
- Dispersionsanteil in $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, PMD 2.Ordnung

Aus der Kausalität der PMD heraus, welche im wesentlichen auf der Symmetrie-Eigenschaft des LWL-Leiters begründet ist, lassen sich bei sorgfältiger Interpretation und Beobachtung über längere Zeiträume von mehreren Leitern tiefgründige Aussagen über den Zustand der Strecke machen. Es

ist ebenfalls ein wichtiger operationeller Parameter, der wesentlich die funktionale Bandbreite des passiven Netzwerkes gut charakterisieren kann [12]. Zudem können Hinweise auf abnormale Schadenseinwirkungen herausgelesen werden: asymmetrische radiale Belastungen, Knicke, Krümmungen usw., Effekte, die zum vorzeitigen Versagen im Sinne einer beschleunigten Alterung der optischen Strecke führen. Die Grösse „PMD“ ist ein ausserordentlich sensitiver Parameter und gibt einen guten Hinweis auf die funktionale Tauglichkeit (siehe nachfolgende Grafik, als diagnostisches Mittel zur Zustandserfassung):

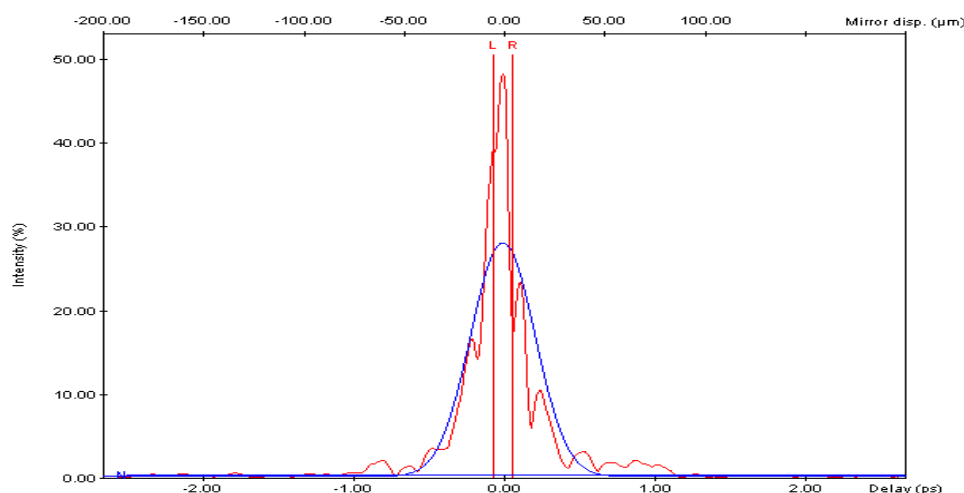


Abb. 36 Beispiel eines Interferometrie-Bildes anlässlich einer PMD-Messung, mit eingefittetem Signal unter Verwendung der Gauss' Kurve [17]

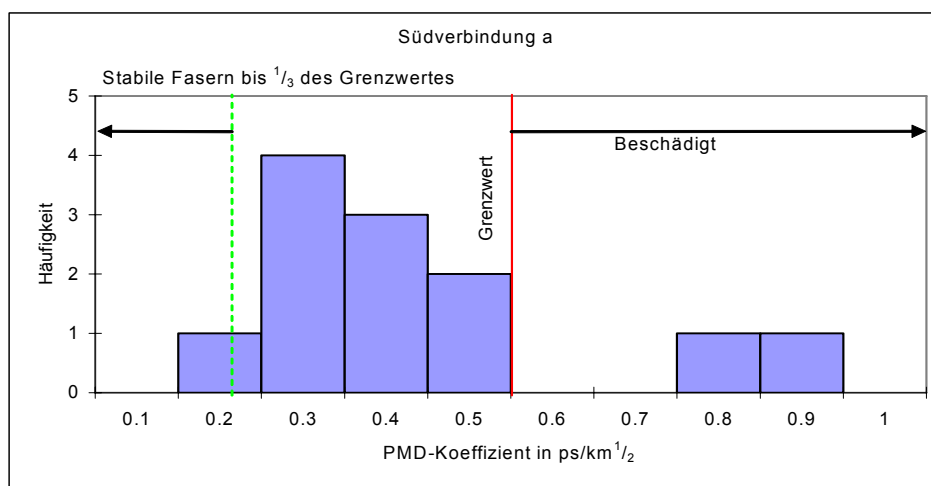


Abb. 37 Die Fasern mit Werten $< \frac{1}{3}$ des Grenzwertes gelten als besonders stabil. Oberhalb gelten die Fasern eher als gefährdet, ausserhalb der Toleranz muss von asymmetrischen, oder evtl. gestressten Fasern ausgegangen werden, da die Modenentkopplung gross ist (Birefringente Fasern) [17]

Eine weitergehende statistische Auswertung der Einzeldaten führt dann auf die Histogramme der Häufigkeiten (die vorgängige und nachfolgende Abbildung). Der Charakter der Stabilität ist wesentlich für die Beurteilung der Qualität (im Sinne von Verlegequalität, Lebensdauer und operativer Übertragungsqualität): durch die Charakterisierung der Verteilung, ihrer Perzentilen und Mittel-/Grenzwerte lassen sich über die Veränderung eben dieser Verteilung verlässliche Schlüsse ziehen über den physikalischen Zustand

und die Qualität der Faser und letztlich über die Eignung sehr hohe Bitraten fehlerfrei, also mit kleiner Bit-Error Rate (BER), übertragen zu können.

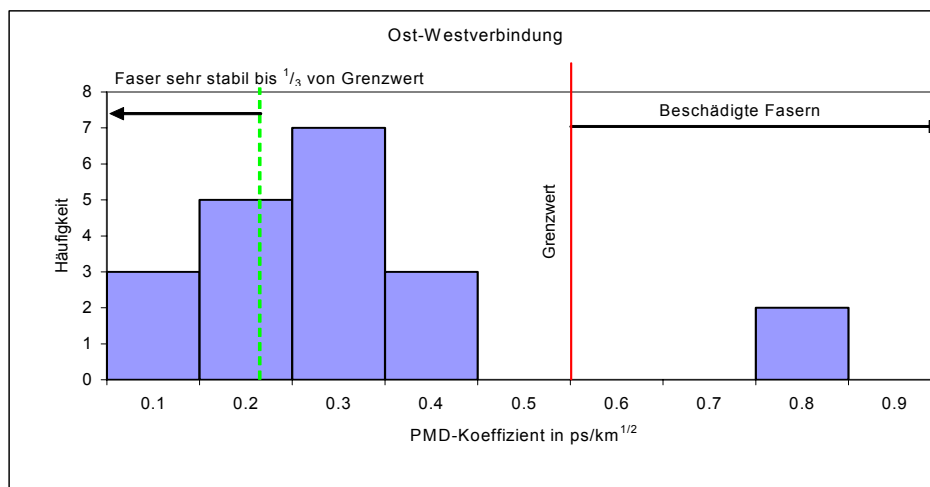


Abb. 38 Grenzwertbetrachtung und Faustregel mit $\frac{1}{3}$ des Grenzwertes, zur Beurteilung der Qualität des Mess-Beispiels [17]

6.5.5.5 OSA-Messung (optical spectrum analyzer)

Bei diesem Messverfahren werden grundsätzlich wellenlängenabhängige Eigenschaften der Übertragungsstrecke beurteilt. Es wird untersucht, in welchem Masse verschiedene Komponenten im Netz (Kabel, Spleisse, Stecker, Abschwächer usw.) das Eingangsspektrum beeinflussen, bzw. es werden die Transferfunktionen („Frequenzgang“) ermittelt. Zudem werden Signal-Rauschabstände, Kanalabstände, Signalhöhen, Übersprechungen (Kreuzmodulationen) erfasst. Es sind Größen, welche vor allem bei Dense Wavelength Multiplexing, bei der Übertragung mehrerer Wellenlängen über die gleiche Faser notwendig werden. Wie bereits oben angedeutet, spielt hierbei die physikalische Integrität der Faser eine wesentliche Rolle für die erhaltene Güte der Strecke. Einbrüche in der Selektivität und der frequenzabhängigen Dämpfung können meist als Hinweis von auftretenden nichtlinearen Einflüssen gewertet werden, die durch ausserordentliche extrinsische Belastungen des LWL hervorgerufen werden können.

Bei stark abweichenden Messergebnissen gegenüber der Norm (ursprüngliche Faserspezifikationen) und bei gleichzeitig erfahrener Auswertung und Interpretation der Messgrößen ist es ratsam, in solchen Fällen die Lieferdokumente der Netzkomponenten (Werksabnahmen) zu konsultieren und die gesamte Installation genau auf mechanische Verlegefehler hin zu untersuchen.

6.5.6 Fazit

Eine gründliche Zustandserfassung über die Zeit erlaubt demnach, mit dem Hilfsmittel des „Pattern Recognition“, frühzeitig das Wegdriften wichtiger funktioneller Parameter von optischen Hochleistungsnetzen zu erkennen, bevor die Übertragungsqualität einbricht.



Aus der Überlegung der Investitionssicherheit heraus ist man bemüht, eine funktionale Lebensdauer für optische Kabelanlagen höherer Reichweite von 25 bis 40 Jahren zu gewähren. Deshalb muss neben der Mindestfestigkeit des LWL auch seine zeitabhängige Ermüdung (Festigkeitsveränderung) in Betracht gezogen werden. Hier ist anzustreben, dass der zeitabhängige Einfluss minimiert wird, durch guten Schutz im Kabel- bzw. Trassenaufbau, so dass der Glaskern jederzeit fern von Umwelteinflüssen gehalten werden kann. Damit kann effizient gegen das Versagen wegen Spannungsrissskorrosion vorgegangen werden.

Um den obigen, destruktiven Grundprozessen entschieden entgegen wirken zu können, müssen prophylaktisch – in der Planungsphase, in der Bauphase und in der Betriebsphase – entsprechende gezielte Massnahmen vorgeschrieben und eingehalten werden. Dank einer eher konservativen mechanischen Auslegung, bezüglich der mechanischen Spannungen in Kabeln (Torsion, Zug, Druck und Querdruck) und bei Kabelendverschlüssen (Biegeradien!), lassen sich weitestgehend belastungsarme Anlagen einrichten. Dies bedingt aber eine strikte Bauaufsicht und vor Inbetriebnahme eine messtechnisch, umfassende optische Abnahmemessung.



7. Zusammenfassende Resultate

7.1 Grundsätzliche Betrachtung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Beurteilung der Zerfallszyklen über eine grosse Bandbreite von Anlagen, Systemen und Komponenten sinnvollerweise auf typische Systeme beschränkt wird. Dieses Vorgehen ist berechtigt, da die grundsätzlichen Alterungsmechanismen stets auf gleiche Gesetzmässigkeiten zurückgeführt werden können, sobald man von der "makroskopischen" auf die "mikroskopische" Sicht wechselt. Makroskopisch bedeutet hier eine ganze Anlage betreffend; mikroskopisch: einen Teil, ein typisches Material einer Komponente betreffend.

Wir haben den Bogen bewusst weit gespannt und zu Beginn mit der Erfassung von typischen Zerfallszyklen die gängige Praxis mit einer – zugegeben beschränkten statistischen Relevanz – erfasst. Auf der anderen Seite haben wir für ausgewählte Systeme die Alterungsmechanismen bis auf die Ebene der Stoff-Alterung und deren Einflussgrössen wie mechanischer Stress und Temperatur untersucht und dargestellt. Damit ist die Basis geschaffen, ausgehend von typischen elektromechanischen Systemen, eine adäquate Methodik zur Bestimmung der voraussichtlichen Nutzungsdauer zu wählen und anzuwenden.

Eine Aufgabe bleibt dem Betreiber von technischen Anlagen allerdings überlassen und kann durch diese Forschungsarbeit nicht gelöst werden: Er muss die Systeme bestimmen, welche er einer vertieften Analyse bez. Nutzungsdauer unterziehen will, denn diese Analyse ist mit etwelchem Aufwand verbunden. Aufgrund von Auswahlkriterien wie Relevanz, Kosten, Wiederbeschaffungsaufwand, etc. muss entschieden werden, welche Anlagen in diese Kategorie gehören. Dieser Entscheid ist stets objektspezifisch und kann deshalb nicht allgemein-gültig gefällt werden.⁶

⁶ In Kernkraftwerken wird beispielsweise eine Liste aller technischen Anlagen und Komponenten erstellt und klassifiziert. Elemente der höchsten Klassifizierungsstufe werden mit grösstem Aufwand beobachtet; d.h. es wird z.B. ein präventiver Ersatz von Komponenten aufgrund des Alterungsverhaltens der einzelnen Stoffe durchgeführt.



7.2 Hinweise und Empfehlungen

7.2.1 Empirische Ermittlung und Beobachtung der Nutzungsdauer

Als Grundlage für sämtliche Nutzungsdauern sollte in jedem Fall auf Basis der empirischen Werte eine *Anlagentabelle* erstellt werden, welche einen Überblick über den Erneuerungsbedarf und die nötigen Investitionen pro Jahr ergibt. Setzt man die Erneuerungszyklen in dieser Tabelle an die untere Grenze (minimal zu erwartende Nutzungsdauern), gibt sie ein brauchbares Instrument für die Budgetierung und Finanzplanung ab. (Im Anhang ist ein Muster einer derartigen Tabelle enthalten.)

Wir schätzen die Genauigkeit dieser Methode ist auf +/- 5 Jahre.

Empfehlung: Die Anlagentabelle mit empirischen Nutzungsdauern ist für jedes Objekt mit technischer Ausrüstung zu erstellen.

7.2.2 Ermittlung der Nutzungsdauer durch Analyse und Diagnostik

Sind genauere Angaben erforderlich, können ausgewählte Anlagen einer vertieften Analyse unterworfen werden, um eine präzisere Nutzungsdauer und allfällig relevante Beschleunigungsfaktoren der Alterung zu ermitteln. Folgende Methoden kommen in Betracht:

- Messungen/Pattern Recognition
- Tests
- Prüfung des Alterungsverhaltens aufgrund des Materials
- Konsultation von Material-Datenbanken mit Alterungsinformationen und Angaben zur Aktivierungsenergie

Die möglichen Verfahren wurden an Beispielen erläutert. Sie setzen in der Regel eine aufwendige Auseinandersetzung voraus.

Empfehlung: Für die Sicherheit relevante Anlagen wie LWL-Anlagen, Energiekabelsysteme, Detektionsanlagen, etc. sollen gemäss obigen Empfehlungen vertieft untersucht werden.⁷

⁷ Diese Anforderung gilt in der Regel nur dann, wenn diese Systeme nicht voll-redundant ausgelegt sind.



7.2.3 Ermittlung der Nutzungsdauer durch Material-Analyse unter Berücksichtigung der Stressfaktoren

Eine vertiefte Analyse der Materialeigenschaften und des Materialverhaltens unter dem Einfluss von Stressfaktoren geben wesentliche Informationen zur Alterungs-Beschleunigung oder Nutzungsdauer-Verkürzung. Zu nennen sind vor allem die herausragenden Einflüsse der Temperatur (bei allen Materialien) und mechanischer Stress bei LWL-Kabeln.

Eine wesentliche Konsequenz dieser Forschungsarbeit besteht darin, dass den Stressfaktoren vermehrt Beachtung geschenkt werden muss. Dabei sind vor allem Temperatur und mechanischer Stress wesentlich:

Eine um 10 Grad höhere Temperatur in einer Zentrale kann die Alterung von bestimmten Komponenten um den Faktor 2 beschleunigen; zu hoher mechanischer Stress beim Einzug von LWL-Kabeln kann die Lebensdauer auf wenige Jahre verkürzen.

Empfehlung: Der Stressfaktor Temperatur ist unbedingt zu beachten. Technische Zentralen sind derart zu planen, dass die Materialtemperaturen unter 25 Grad liegen.

LWL-Neu-Anlagen sind derart zu erstellen, dass kein mechanischer Stress entsteht. Dies bedingt ein „dramatisches“ Umdenken und ein stark erhöhter Aufwand für die entsprechende Planung und Fachbauleitung.



8. Anhang A1: Beschleunigte Alterung bei erhöhter Temperatur

8.1 Die Arrhenius-Gleichung

In der Kunststofftechnik wird die Alterung und deren Simulation häufig mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung beschrieben und untersucht.

Im Grundsatz liegt die Beobachtung zu Grunde, dass eine chemische Reaktion bei Erhöhung der Temperatur schneller abläuft. Es wurde festgestellt, dass eine Temperaturerhöhung um rund 10° C eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit ausmacht. Diese Verdoppelungsregel gilt als guter Richtwert, in der Praxis liegt er zwischen 1.6 und 2. Dies ist gleichbedeutend mit einer Lebensdauerverkürzung bezogen auf die Raumtemperatur um diesen Faktor 1.6 bis 2!

Da der *Alterungsprozess* in den meisten Fällen auch auf chemische Reaktionen zurückgeführt werden kann, gilt diese Beobachtung auch für viele Systeme und Komponenten der technischen Ausrüstung von Tunneln sinngemäss.

Eine Erhöhung oder Verminderung der Reaktionsrate kann mit folgender Gleichung – der Arrhenius-Gleichung – beschrieben werden:

$$r = \frac{dq}{dt} = A * \exp\left(\frac{-E}{kT}\right)$$

q	Chemische (Alterungs-) Reaktion
r	Reaktionsrate
A	Materialkonstante
E	Aktivierungsenergie
k	Boltzmann-Konstante
T	Absolute Temperatur

8.2 Die 10-Grad-Regel

Die Formel kann für die 10-Grad-Regel im Hinblick auf die Bestimmung der Beschleunigungsfaktoren wie folgt abgeleitet und dadurch vereinfacht werden (Verhältnis der Reaktionsraten): Faktoren >1 besagen, dass der Alterungseffekt um diesen Faktor bei der erhöhten Temperatur beschleunigt abläuft oder entsprechend um diesen Faktor bei erhöhter Temperatur die „Lebenszeit“ verkürzt wird:

$$\frac{t_s}{t_a} = \exp^{\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a} \right)}$$

- ts Reaktionsrate bei Raumtemperatur (275 K)
- ta Reaktionsrate bei erhöhter Temperatur
- E Aktivierungsenergie (z.B. 0.5 eV)
- k Boltzmann-Konstante, $8.6 \cdot 10^{-5}$ eV/K
- Ts Raumtemperatur
- Ta Erhöhte Temperatur

Hiermit kann nachvollzogen werden, dass bei einer Aktivierungsenergie von 0.5 eV und einer erhöhten Temperatur von 10 Grad (über der Raumtemperatur) eine beschleunigte Alterung um den Faktor 2 erhalten wird.

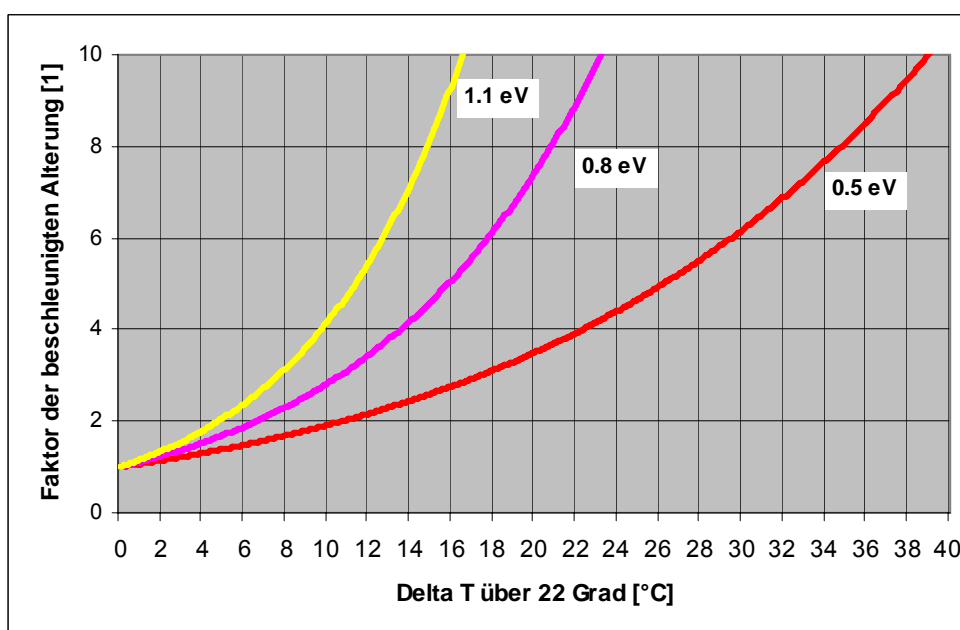


Abb. 39 Die Kurven zeigen die beschleunigte Alterung in Funktion der Differenz zur Umgebungstemperatur (22 Grad) an

Eine Erhöhung der Temperatur um 10 Grad (von 22 auf 32 Grad) erhöht die Alterung bereits um den Faktor 2 – bei einer Aktivierungsenergie von 0.5 eV. Beträgt die Aktivierungsenergie 0.8 eV, verursacht eine Temperaturerhöhung von 10 Grad bereits eine beschleunigte Alterung knapp um den Faktor 3. Diese wichtige Grösse - unabhängig von der Temperatur - ist aber leicht abhängig von sonstigen extrinsischen Zusatzbelastungen. Damit zeigt sich, dass die Sensitivität der Aktivierungsenergie entscheidend ist für eine quantitative Beurteilung. Es liegen jedoch in der Schweiz Erfahrungswerte vor, welche für diese Betrachtung herangezogen werden können:

Technische Komponente	Aktivierungsenergie E[eV]
Hochspannungskabel-Isolation	0.5
LDPE	0.94 (bei 6kV/mm) 0.82 (bei 20kV/mm)
XLPE (for 250kV Isolation)	0.9-1.0

HDPE	0.7
Elektronische Komponente (IC)	0.7

Abb. 40 Typische Werte von Aktivierungsenergien

Dadurch lässt sich mit hinreichender Plausibilität begründen, dass die Raumtemperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer ausübt. Die Erkenntnis, hier am Beispiel der Energiekabel erläutert, lässt sich auch auf andere technische Komponenten erweitern: Integrierte Schaltkreise (IC) werden z.B. mit sogenannten "High Temperature Operating Life-tests" getestet. Dabei werden die Bauteile z.B. 3000 Stunden bei 150 Grad getestet. Ist die Stichprobe der Tests ausreichend gross, kann eine statistisch relevante Aussage bez. der Ausfallrate (MTTF) gemacht werden.

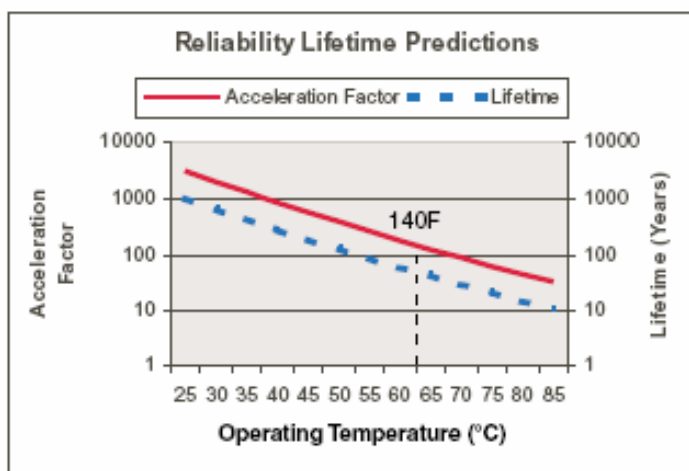


Abb. 41 Analog Devices testet Messumformer-Schaltkreise(IC) bei erhöhten Temperaturen. Auf Basis der Arrhenius-Gleichung mit Aktivierungs-Energie von 0.7eV wird die Lebenserwartung angegeben (Quelle: Analog Devices)

Sollen andere Stressfaktoren ausser der Temperatur berücksichtigt werden, sind erweiterte Modelle im Einsatz. Das Eyring-Modell erlaubt im Prinzip eine beliebige Erweiterung mit zusätzlichen Stressfaktoren wie Spannung oder Strom und berücksichtigt auch den Beschleunigungsfaktor der Stress-Kombinationen.

$$t_f = AT^\alpha \exp\left\{\frac{\Delta H}{kT} + \left(B + \frac{C}{T}\right)S_1\right\}$$

Beschleunigungs-Modell nach Eyring

Der hier dargestellte zusätzliche Stress S_1 erweitert den Ausdruck, der im Prinzip der Arrhenius-Formel stark gleicht. Die Parameter Alpha, Delta H, B und C bestimmen die Beschleunigung für die Stress-Kombinationen. (Das Eyring-Modell wird hier nicht weiter erläutert).



9. Anhang A2: Beschleunigte Alterung bei Glasfasern, Modellbeschreibung

9.1 Allgemeiner Hintergrund

Ein Bruch der Faser tritt dann auf, wenn unter mechanischer Last Mikrorisse zu einer kritischen Grösse heranwachsen können. Dieser Prozess ist deshalb unter allen Umständen zu vermeiden, weil dieser Vorgang positiv rückgekoppelt abläuft. Je tiefer der Riss, desto höher die Flächenbelastung, welche für die Rissgeschwindigkeit bestimmend ist. Das Risswachstum lässt sich mit einem sogenannten Suszeptibilitäts-Parameter n beschreiben. Ein grosser Wert bedeutet ein schnelleres Wachstum des Risses, also kleinere Lebensdauer.

Mechanische Belastungen, welche sich überlagern oder die Einwirkung von Vibrationen, beschleunigen entscheidend allfällige Mikrorisse. Kommen noch Verschmutzungen, die Migration von Feuchte, OH-Ionen, Säuren und höhere Temperaturen dazu, wird diese Art von Alterungsprozessen stark beschleunigt. OH-Ionen beschleunigen das Risswachstum an der Oberfläche der Faser ganz besonders, da chemische Reaktionen ausgelöst werden. Die minimale Zeit bis zum Bruch kann formal wie folgt ausgedrückt werden:

Der Stress auf die Faser kann durch zwei unterschiedliche, mathematisch - physikalische Modelle beschrieben werden:

- 1) über das Modell des Risswachstums (stress corrosion) oder
- 2) über das Modell der Aktivierungsenergie, gemäss der Arrhenius-Formel

Bei beiden Ansätzen ist der äussere Einfluss der Umwelt in Form von klimatischen (Temperatur und Feuchte) und mechanischen Beanspruchungen nicht zu vernachlässigen und werden mit zusätzlichen Faktoren meist empirisch nachgebildet.



9.2 Das Modell Risswachstum (Stressmodell)

Die wichtigsten Elemente sind beim Stressmodell:

Das Risswachstum ist proportional zum Stress-Intensitäts-Faktor K zur Potenz n ($\sim K^n$)

$$\frac{da}{dt} = A \times K^n$$

wobei:

da/dt: Geschwindigkeit der Alterung

a: Risstiefe

A: Skalierungsgrösse

K: Stress-Intensitätsfaktor

n: Suszeptibilitätsfaktor der Faser, typisch $n = 18 \dots 20$

Diesem Ansatz liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass beim Risswachstum ein positiv rückgekoppelter Prozess stattfindet, der das Wachstum beschleunigt über die zunehmend kleiner werdende Restfläche bei äusserer applizierter Krafteinwirkung.

Folgender Zusammenhang kann dargestellt werden: (Herleitung in [13]), mit der Einführung der statischen Last σ und der Lebensdauer t :

$B \cdot S = \int_0^t \sigma^n dt$ (failure)

Das Potenzgesetz für die Zeit der Lebensdauer bei statischer Belastung erhält man approximativ durch weitere Annahmen und Vereinfachungen und nach der Zeit aufgelöst:

$$\text{MTBF (fiber)} \quad t \cong \frac{B \times S^{(n-2)}}{\sigma^n} \cong \left(\frac{S}{\sigma} \right)^n \text{ (vereinfacht)}$$

wobei:

B Substitution der Variablen bzw. Konstanten A, K, n

S Grösse, welche die Qualität der Faser beim Herstellungsprozess ausdrückt. Die Ermittlung erfolgt über einen Zugversuch ("stress screening")

σ Statische Zuglast im Betrieb der Faser

n Suszeptibilitätsfaktor der Faser

Der obige Ausdruck ist eine Vereinfachung [14], die eine Abschätzung der Belastung bzw. Lebensdauer erlaubt.

9.3 Das Modell Aktivierungsenergie

Bei der zweiten Methode geht man davon aus, dass das Risswachstum als Haupt-Fehlermechanismus in erster Ordnung dem oben beschriebenen Arrhenius-Gesetz mit der Aktivierungsenergie 1eV bis 1.6eV folgt.

Führt man nun das Modell, welches auch für die beschleunigte Alterung eingesetzt wird, weiter auf zahlreiche mögliche Mikrorisse, die alle der gleichen Gesetzmässigkeit folgen aber als unabhängige Ereignisse angesehen werden was das Risswachstum anbetrifft, so erhält man aus den obigen Methoden ein statistisches Modell mit den abgeleiteten Fehlerraten bzw. eine Aussage zur möglichen Lebensdauer. Eine zusammenfassende Grafik (nach dem Stressmodell) lässt erkennen, dass die statische Belastung stark die funktionale Lebensdauer beeinflusst.

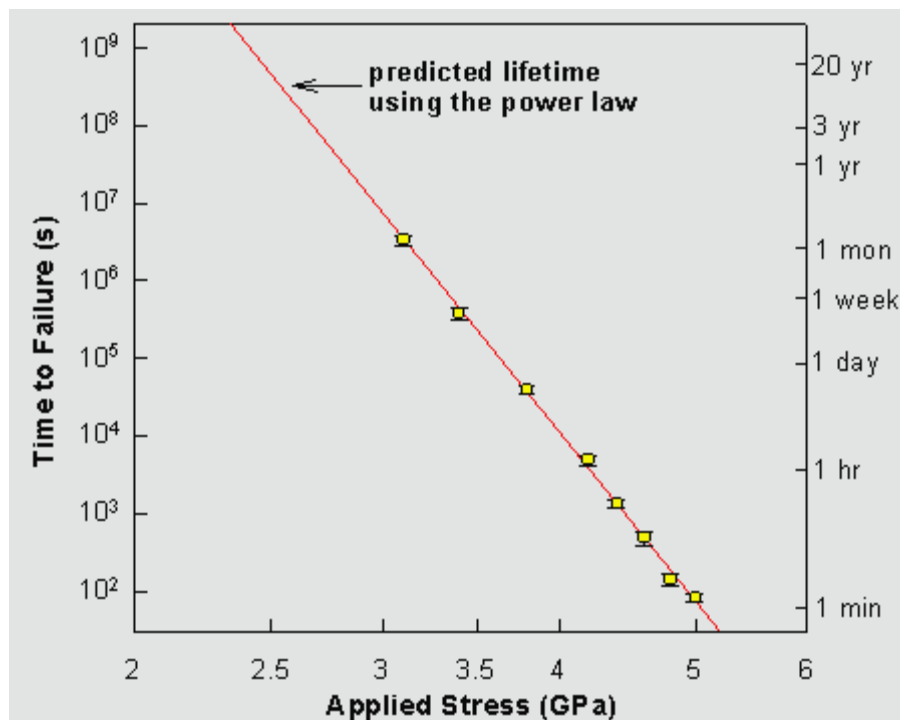


Abb. 42 Statische Belastung und Vorhersage der Lebensdauer einer Glasfaser [15]

Setzt man die Lebensdauer der Faser (als MTTF, Mean Time To Failure) in die folgenden Gleichungen der Fehlerbetrachtungen zur Berechnung der FIT (Failure in Time, 1 FIT entspricht 1 Ausfall in inner 1 Mia Jahren), der Fehlerrate und der Überlebensrate (WS) ein, so erhält man interessante Grössenordnungen für die Abschätzung der Systemsicherheit.

Unter der Voraussetzung, dass die Belastung 2.5GPa nicht überschreitet, ergeben sich aus obiger Abbildung folgende Werte:

Lebensdauer 20 Jahre
 Fehlerrate 5.716 E-6 oder 5710 FIT



oder In 99.99% der Fälle wird das System die ersten 10 Jahre überleben.

Im Falle einer nur 7% erhöhten statischen Last, wird die Faser aber nur 3 Jahre überleben, 10 Jahre werden praktisch nicht mehr erreicht.



11. Literaturverzeichnis

- [1] SN 640901 Zielsystem
- [2] U. Dinesh Kumar et al.: Reliability, Maintenance and Logistic Support: A Life Cycle Approach, Boston Kluwer Academic Publishers, 2000
- [3] A. Birolini: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme, Springer-Verlag, 1990, 1998
- [4] Maintenance Excellence: Optimizing equipment Life-Cycle Decisions, ed. by John D. Campbell, Andrew K.S. Jardine. New York, Marcel Dekker, 2001
- [5] Henrikke Baumann: Life Cycle Assessment and Decision Making: Theories and Practices. Göteborg, Chalmers University of Technology, 1998
- [6] SN 640904 Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und Technischen Ausrüstungen: Substanz- und Gebrauchswert, 2003
- [7] SN 505 197/2 Projektierung Tunnel/Strassentunnel, SIA 2004
- [8] Walter S. Zaengl, Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency domain for HV Power Equipment (Transformers, cables etc.), 12th Int. Symposium on High Voltage Engineering ISH 2001, Bangalore India, 20-24. August 2001.
- [9] Jean Jacques et al., A Novel Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents conceived for On-Site Diagnosis of Electric power Apparatus, IEEE 2000 Int. Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA, USA, 2.- 5. April 2000.
- [10] R. Bräunlich et al., Assessment of Insulation Condition of large Power Transformers by ON-Site Electrical Diagnostic Methods, IEEE, International Sym. On Electrical Insulation, Anaheim CA, 2.-5. April, 2000.
- [11] Roland Zimmerli, Alterungsverhalten von Mittelspannungskabeln, Bulletin SEV/VSE, Nr. 21, 2002
- [12] PSEL-Untersuchung , ausgeführt von der EMPA: „Long Term Stability of Aerial Optical Cables with respect to Gb/s Data Rates, by M. Held et al, EMPA).
- [13] Analysis of the Proof Test with Power Law Assumptions by Th. A. Hanson, SPIE Vol. 2074, 1993
- [14] Corning AEN 21, Rev. 4, Oct, 02



- [15] SPIE Conference on Optical Fiber reliability and testing, Boston, 1999
"Mechanical reliability of silica fiber: a case study for a biomedical application, by Y. Yshuie and M. John Matthewson, Rutgers University"
- [16] Th. Heizmann, Diss. ETH Nr. 10858, Ein Verfahren zur Bestimmung des Alterungszustandes von verlegten polymerisierten Mittelspannungskabeln
- [17] "Fachkommission für optische Hochleistungsnetze" (FKO), Fachtagungsband 26.11.2002
- [18] L. Boudou, J. Guastavino, "Influence of temperature treatment on the electrical properties of low-density polyethylene", J. Phys. D: Applied Physics 33 (2000), L129-L131
- [19] Steven Boggs et al., "Effect of Insulation Properties on the Field Grading of Solid Dielectric DC Cable", accepted for publication in IEEE Trans PD.
- [20] Kenneth R. Shull et al., "Aging Characterisation of Polymeric Insulation in Aircraft Wiring via Impedance Spectroscopy", paper from the Northwestern University Evanston, IL 60208.
- [21] Y.S. Shiue, M.J. Matthewson, "Apparaent activation energy of fused silica optical fibers in static fatigue in aqueous environments", in Journal of the European Ceramic Society 22 (2002), page 2325-2332.



12. Glossar

Technische Ausrüstung	Allgemeiner, auch im Rahmen der VSS-Normung üblicher Begriff für die elektromechanischen Anlagen und Systeme im Zusammenhang mit Strassenverkehrsanlagen.
Zerfalls-Zyklus	Im Rahmen dieser Forschungsarbeit verwendeter Begriff für die zu erwartende, wirtschaftlich vertretbare Nutzungsdauer eines Systems
Nutzungsdauer	Die voraussichtliche Dauer, während der ein System im Einsatz steht. Die Nutzungsdauer wird von verschiedensten, nicht systembezogenen Faktoren beeinflusst und kann kürzer als die Lebensdauer sein.
Lebensdauer	Die maximale Nutzungsdauer, während der eine Anlage eingesetzt werden kann; i.d.R. die Zeit bis die Fehlerhäufigkeit anzusteigen beginnt
Badewannenkurve	Die Badewannenkurve zeigt die Fehlerhäufigkeit im Verhältnis zur Zeit im Leben eines technischen Systems auf. Sie ist für einen grossen Teil der technischen Anlagen zutreffend.
Useful Life Period	Wörtlich übersetzt „die nützliche Lebensdauer“, gemeint ist: die Nutzungsdauer, die sinnvoll, angemessen, vertretbar ist.
UPlanNS	Die <u>U</u> nterhalt <u>pl</u> anung für <u>N</u> ational <u>s</u> trassen soll übergeordnet Ziele erfüllen, welche in Form von Arbeitshypothesen vom ASTRA formuliert wurden: Maximale Länge eines Unterhaltsabschnitts: 15 km, minimaler Abstand zwischen zwei Unterhaltsabschnitten: 50 km und minimaler unterhaltsfreier Zeitraum auf einem Unterhaltsabschnitt: 10 Jahre
ASTRA	Bundesamt für <u>S</u> trassen



Pattern Recognition	Analysemethode, welche komplexe Verhaltensmuster von technischen Anlagen anhand bestimmter Zusammenhänge bei unterschiedlichen Beobachtungszeiten miteinander vergleicht und Abweichungen zum bekannten Muster erkennt und auswertet. Diese Methoden werden vermehrt in der Energietechnik zur Beurteilung der Kabelisolation und in den optischen Netzen zur Zustandserfassung eingesetzt.
Fingerprint	Engl. für „Fingerabdruck“: Typisches Verhaltensmuster bei Ausfällen
Hot Spots	Mit "hot spots" (engl. für heiße Flecken) werden Orte und/oder Bauelemente in elektronischen Geräten bezeichnet, welche warm bzw. heiss werden. Sie unterliegen damit einer beschleunigten Alterung und sind häufig verantwortlich für Geräte-Ausfälle.



13. **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1	Erhaltungsmanagement von technischen Ausrüstungen	10
Abb. 2	Darstellung der Nutzungsdauer/Lebensdauer mittels Badewannen-Kurve	12
Abb. 3	Darstellung der Lebens- und Nutzungsdauer mittels Badewannen-Kurve	13
Abb. 4	Substanzwert monetarisiert [6]	15
Abb. 5	Gründe für Gesamtanierungen	16
Abb. 6	Nutzungsdauern im Kanton 1	19
Abb. 7	Nutzungsdauern Kanton 2, mittlere Nutzungsdauer liegt bei rund 13 Jahren	19
Abb. 8	Nutzungsdauern im Kanton 3	20
Abb. 9	Nutzungsdauern im Kanton 4	20
Abb. 10	Nutzungsdauern in einem Elektrizitätswerk	21
Abb. 11	Typische Nutzungsdauern gemäss der Tunnelnorm SN 531 197/2 [7]...21	
Abb. 12	Die Tabelle zeigt die durchschnittlichen Werte der Nutzungsdauern	22
Abb. 13	Nutzungsdauern im Durchschnitt	22
Abb. 14	Übersicht Lampentypen und Eigenschaften	25
Abb. 15	Lichtstromverhalten über die Betriebsstunden (Quelle: Philips)	27
Abb. 16	Ausfall bezogen auf die Betriebsstunden (Quelle: Philips)	27
Abb. 17	Einfluss der Schaltungshäufigkeit auf die mittlere Lebensdauer (Quelle: Osram)	28
Abb. 18	Verhalten von langlebenden Leuchtstofflampen (Quelle: AURA)	29
Abb. 19	Lebensdauer in Abhängigkeit vom verwendeten Betriebsgerät (Philips)	30
Abb. 20	Lichtstromverhalten und Überlebensrate, Schaltzyklus von 3 Stunden (Quelle: Osram)	31
Abb. 21	Durchschnittliche Nutzungsdauern (unterbrochene Linien bezeichnen die Erfahrungswerte)	33
Abb. 22	Muster-Struktur eines Leitsystems	34
Abb. 23	Typischer Lebenszyklus von Leittechniksystemen	35
Abb. 24	Unterscheidung der Ausfall-Ursachen	36



Abb. 25	Darstellung der physikalischen Ursachen von Ausfällen bei Halbleitern sowie Angaben zur Aktivierungsenergie (vgl. Anhang sowie [18] ...[21])	37
Abb. 26	Standard-PCs eignen sich nur bedingt für professionelle Anwendungen: Problemstellen sind Lüfter, Dimensionierung der Netzgeräte, Disks.....	38
Abb. 27	Typische Nutzungsdauern mit Betrachtung der Fehlermechanismen (Empirische Werte und Angaben von Herstellern)	38
Abb. 28	Vergleich von verschiedenen PC-Typen und deren entsprechender	39
Abb. 29	Grosser Anstieg der Ausfallrate bei überschreiten von 70% der maximal zulässigen Umgebungstemperatur.....	41
Abb. 30	Durchschnittliche Nutzungsdauern ohne Stressfaktoren.....	41
Abb. 31	Forcierte Alterung wird durch verschiedene Einflussgrössen ausgelöst .	43
Abb. 32	Bei speziellen Ereignissen ist eine Diagnose zur Verifizierung einer allfälligen vorzeitigen Alterung angezeigt, $t_2 - t_1$ entspricht der vorzeitigen Alterung	46
Abb. 33	Statische Belastung und Vorhersage der Lebensdauer einer Glasfaser [3]	48
Abb. 34	Stressreduktion mit gleichzeitiger Isolierung der Faser vor Umwelteinflüssen führen zu erheblichen Lebensdauererhöhungen.....	49
Abb. 35	Übertragungsverluste aufgrund von Biegungen, dargestellt am Beispiel von 2 typischen Wellenlängen (Quelle: Dr. G. Farrell, Dublin Institute of Technology).....	50
Abb. 36	Beispiel eines Interferometrie-Bildes anlässlich einer PMD-Messung, mit eingefittetem Signal unter Verwendung der Gauss' Kurve [17]	52
Abb. 37	Die Fasern mit Werten $< \frac{1}{3}$ des Grenzwertes gelten als besonders stabil. Oberhalb gelten die Fasern eher als gefährdet, ausserhalb der Toleranz muss von asymmetrischen, oder evtl. gestressten Fasern ausgegangen werden, da die Modenentkopplung gross ist (Birefringente Fasern) [17]	52
Abb. 38	Grenzwertbetrachtung und Faustregel mit $\frac{1}{3}$ des Grenzwertes, zur Beurteilung der Qualität des Mess-Beispiels [17]	53
Abb. 39	Die Kurven zeigen die beschleunigte Alterung in Funktion der Differenz zur Umgebungstemperatur (22 Grad) an.....	59
Abb. 40	Typische Werte von Aktivierungsenergien	60
Abb. 41	Analog Devices testet Messumformer-Schaltkreise(IC) bei erhöhten Temperaturen. Auf Basis der Arrhenius-Gleichung mit Aktivierungs-Energie von 0.7eV wird die Lebenserwartung angegeben (Quelle: Analog Devices)	60
Abb. 42	Statische Belastung und Vorhersage der Lebensdauer einer Glasfaser [15]	63